

EBV. L.
Ghinzburg**Astrofizica
contemporană**

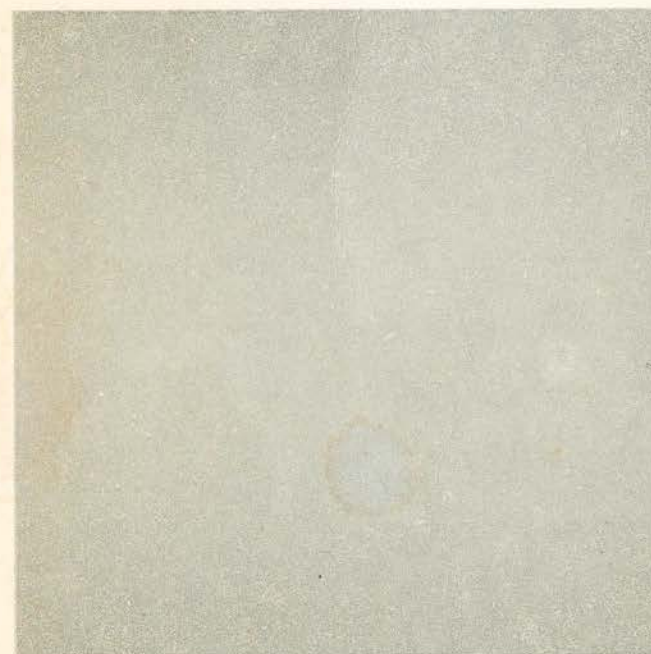
În ultimul sfert de secol, ca urmare a utilizării unor mijloace de cercetare de tip nou, în astronomie s-au făcut numeroase descoperiri de imensă însemnătate, cu mari repercusiuni asupra fizicii, a științei în general, a imaginii de ansamblu pe care ne-o facem despre lume. În avangarda cercetărilor astronomice pășește astrofizica, „știință de graniță” cu mari perspective. În lucrarea de față V. L. Ghinzburg, membru al Acad. de Științe a U.R.S.S., savant cu reputație internațională, familiarizează pe cititori într-un mod interesant și accesibil cu cele mai noi și mai importante dintre aceste descoperiri, cu problemele de largă anvergură pe care ele le ridică și cu teoriile (uneori încă în stadiu de ipoteză) prin care știința modernă încearcă să le dea răspuns.

— Iată câteva din aspectele tratate în cuprinsul cărții —
 — Care sînt cele mai caracteristice trăsături ale astrofizicii contemporane și cu ce probleme fundamentale este ea confruntată? — Care este structura universului și cum evoluează ea în timp? — Ce semnificație are expansiunea universului? — Are universul „vîrstă”? — Care sînt „martorii” trecutului său cel mai îndepărtat? — Ce este radiația cosmică și care e originea ei? — Ce sînt quasarii și pulsarii? Ce ne revelează ei despre univers? — Există stele neutronice?

Lei 7,50

EB

ENCICLOPEDIA DE BUZUNAR

V. L.
GHINZBURG**Astrofizica
contemporană**

EDITURA ENCICLOPEDICĂ ROMÂNĂ

EB

ENCICLOPEDIA DE BUZUNAR
Seria „SINTEZE“

Novi 5

V. L. Ghinzburg

**Astrofizica
contemporană**

În românește de
DAN RĂUTU și ELENA TOMA

Editura enciclopedică română
București © 1972

Витали Лазаревич Гинзбург
СОВРЕМЕННАЯ АСТРОФИЗИКА
Издательство НАУКА
Москва, 1970

Prefață

De un sfert de secol descoperirile astronomice se succed una după alta și totuși se așteaptă în continuare noi descoperiri importante. Au fost descoperite radiogalaxiile, „stelele Roentgen“, quasarii și pulsarii, radiația sincrotronă și remanentă cu spectru continuu, radiația din domeniul radio monocromatică a hidrogenului, a hidroxilului, a amoniacului și a apei. Se cercetează diversele nuclee atomice, electronii și pozitronii din radiația cosmică. S-a trecut la folosirea rachetelor și a sateliților pentru observațiile astronomice. A luat ființă astronomia radiației gamma, astronomia radiațiilor Roentgen și astronomia în domeniul submilimetric, fără să ne mai referim la impresionantele progrese din domeniul astronomiei optice și mai ales al radioastronomiei. Se fac investigații pentru a pune în evidență particulele neutrino de proveniență cosmică și undele gravitaționale.

Au fost clarificate multe probleme, dar înaintea cercetătorilor au apărut și mai multe probleme noi, și mai multe enigme. S-au deschis larg zăgazurile pentru o dezvoltare impetuoasă și continuă.

Desigur, toate acestea au făcut să crească și mai mult atenția și interesul pentru astronomie. Ar fi foarte regretabil dacă cercurile largi de cititori nu ar putea să-și satisfacă curiozitatea decât cu o întârziere apreciabilă sau ar avea drept sursă de informație

doar știrile insuficient de detaliate și adesea insuficient de exacte care apar în ziare și în unele reviste de popularizare a științei. Aceste considerente, ca și dorința de a împărtăși cititorilor entuziasmul față de succesele științei și sentimentul de încordată așteptare a unor noi realizări, l-au îndemnat pe autor să scrie o serie de articole de popularizare. Cinci dintre aceste articole constituie cuprinsul acestui mic volum. Primul („Astrofizica contemporană”) reprezintă un fel de introducere la întreaga culegere. Cu prilejul pregătirii articolelor pentru tipar ele au fost, bineînțeles, revizuite și completate în conformitate cu nivelul astrofizicii de la începutul anului 1969. Ulterior, au mai fost făcute și alte precizări și puneri la punct.

O culegere de articole nu este o monografie, întocmită după un plan unic și deci lipsită de repetări; pe de altă parte însă, fiecare dintre articolele cuprinse în culegere poate fi citit independent de celelalte, ceea ce reprezintă un anumit avantaj. În orice caz, autorul a făcut tot ce i-a fost cu putință și va încerca o sinceră bucurie dacă alți fizicieni și astrofizicieni vor oferi atenției cititorilor lucrări de popularizare a științei mai desăvârșite.

În încheiere exprim sincerele mele mulțumiri lui S.B. Pikeľner și lui N.A. Raikaia pentru o serie de observații utile, făcute de ei cu prilejul lecturii manuscrisului.

V. L. Ghinzburg

1

Astrofizica contemporană

Astronomia a luat ființă în antichitate și poate că n-ar fi o exagerare să considerăm că are aceeași vîrstă cu civilizația umană. Dar importanța atribuită astronomiei, atenția ce i s-a acordat în diverse etape ale istoriei nu au fost întotdeauna aceleași. Perioade de relativă acalmie erau urmate de epoci bogate în descoperiri remarcabile. Fără doar și poate, ziua de 4 octombrie 1957, cînd a fost lansat primul satelit artificial al Pămîntului, trebuie considerată ca data care a marcat începutul uneia dintre aceste epoci. Evident, posibilitatea de a trimite în spațiul cosmic dispozitive mecanice și oameni are pentru întreaga omenire o mare semnificație, care depășește mult cadrul aspectului pur științific, în speță astronomic. Dar chiar dacă ne vom concentra atenția numai asupra problemelor științifice, este greu să apreciem la justa ei valoare importanța lansării sateliților și a rachetelor cosmice.

Pe de altă parte, ar fi greșit să discutăm problemele științifice legate de lansarea sateliților și a rachetelor fără a le privi în legătura lor firească cu caracterul și tendințele de dezvoltare ale astronomiei și astrofizicii contemporane.

Care sînt aceste tendințe și care sînt astăzi cele mai caracteristice trăsături ale astronomiei și mai ales ale astrofizicii ca parte constitutivă a acesteia? Ce probleme din domeniul astronomiei —

știința despre univers, despre cosmos — trebuie considerate astăzi ca fundamentale sau deosebit de importante și actuale?

Nu avem pretenția să răspundem cât de cât exhaustiv la aceste întrebări. Putem doar să supunem atenției cititorilor o serie de observații, uneori discutabile, care se referă la problemele, realizările și căile de dezvoltare ale astrofizicii moderne.

Care sînt cele mai caracteristice trăsături ale astrofizicii contemporane?

Uneori se afirmă că trăsătura caracteristică a dezvoltării științei în epoca noastră este ritmul rapid al acestei dezvoltări. Cînd e vorba de știință în ansamblul ei sau despre marile ei compartimente, cum sînt astronomia, fizica, biologia și matematica, nu credem că acest punct de vedere poate fi acceptat.

Într-adevăr, ce înseamnă ritmul de dezvoltare a științei? De bună seamă, ceva analog ritmului de creștere a industriei, ceva ce poate fi caracterizat prin creșterea volumului producției, bunăoară în decurs de un an. Este adevărat că volumul „producției științifice” este mult mai greu de apreciat sau de măsurat decît produsele economiei naționale, care pot fi evaluate direct în bani. Există totuși destui indicatori care caracterizează ritmul de dezvoltare a științei. Dintre aceștia fac parte: numărul cercetătorilor, cheltuielile materiale pentru cercetarea științifică, numărul revistelor științifice și al studiilor care apar în ele. Din păcate, informația de care dispunem în această privință este cu totul incompletă. Ea atestă totuși destul de convingător că în ultimii 200—300 de ani ritmul de creștere a științei în ansamblu sau a diferitelor discipline suficient de dezvoltate (matematica, fizica etc.) se caracterizează printr-o constantă remarcabilă, reprezentînd aproximativ 5—7 % pe an.

Modificări destul de mari ale ritmului s-au observat în timpul celor două războaie mondiale, dar în ansamblu, după cum am mai spus, în decursul unei perioade îndelungate ritmul de dezvoltare a științei se caracterizează printr-o anumită con-

stanță, fapt care nu trebuie să ne surprindă prea mult. Să ne gîndim că mărirea constantă a procentului anual de creștere a producției are următoarea semnificație: creșterea producției — a numărului de studii științifice, de pildă — într-un an oarecare, este raportată la nivelul deja atins, adică la numărul de articole publicate pe an în perioada examinată (după cum se știe, o asemenea lege de variație, care în cazul de față exprimă creșterea volumului producției în funcție de timp, se numește exponențială¹).

S-ar putea crede că această lege a constantei ritmului de dezvoltare nu va acționa nelimitat, dar în epoca contemporană și în viitorul apropiat nu este de așteptat să apară factori care să limiteze creșterea cantitativă a producției și a științei.

Chiar în cazul unui ritm de creștere de 5% producția științifică se mărește în 50 de ani de zece ori, iar în 100 de ani de 100 de ori. Or, populația globului a crescut în medie, în ultimul secol, cu aproximativ 1% pe an, ceea ce înseamnă că în 100 de ani populația n-a făcut decît să se tripleze (în secolele XVII și XVIII ritmul de creștere a populației a fost mai redus). Această deosebire între ritmurile de creștere a științei și a populației este o reflectare și, dacă vreți, o manifestare a adevărului binecunoscut că rolul științei în viața societății crește neîncetat.

Revenind la tema noastră, putem constata că nu ritmul înalt al dezvoltării este cel ce deosebește considerabil astronomia contemporană de cea din ultimele trei secole². Această

¹ Deoarece în formula corespunzătoare variabila timp figurează ca exponent ($N.T.$).

² În pofida constantei ritmului de creștere a științei, impresia că în ultima perioadă producția științifică a crescut impetuos este și ea îndreptățită și întru totul inteligibilă, dat fiind caracterul exponențial al dependenței. Într-adevăr, această dependență este dată de formula $y = y_0 e^{t/T}$, unde, în cazul care ne interesează, y este un indicator oarecare al cantității de producție științifică în domeniul respectiv, iar t timpul (cînd $t = 0$ valoarea lui $y = y_0$). În timpul caracteristic T indicatorul y va crește de e ori ($e = 2,72$), așa încît, de pildă, valoarea $T = 20$ corespunde creșterii lui y cu 5% pe an. Derivata $dy/dt = (y_0/T)e^{t/T} = y/T$, adică creșterea dy este proporțională cu valoarea lui y , iar ritmul de creștere $\frac{dy}{dt} = \frac{1}{T}$ este constant. Pe de altă

parte, valoarea indicatorului y la momentul dat t este determinată de creșterea lui în ultima perioadă de timp a duratei T . De exemplu, fie y_0 numărul total de articole dintr-un domeniu oarecare apărute în

afirmație poate fi ușor verificată dacă comparăm, de pildă, dimensiunile instrumentelor astronomice.

Telescopul lui Galilei, primul din istorie care a fost îndreptat spre cer (la 7 ianuarie 1610), a fost confecționat de mîinile lui și avea lungimea de numai un metru, diametrul lui fiind ceva mai mare de 5 cm. Treptat, dimensiunile telescoapelor au crescut, și astăzi cel mai mare telescop optic, care a intrat în funcțiune în 1948, are o oglindă cu un diametru de 5 m. De aici rezultă că puterea de rezoluție și luminozitatea telescoapelor, care sînt caracterizate de diametrul și suprafața lentilelor sau a oglinzilor, au crescut respectiv de 100 și de 10 000 de ori.

Dacă e să vorbim nu despre aspectul cantitativ al problemei, ci despre calitate, care are în știință un rol cu totul deosebit, nici sub acest raport nu putem subaprecia realizările remarcabile ale înaintașilor noștri. Descoperirile lui Galilei, care a putut să detecteze munții din Lună, petele de pe discul solar, fazele planetei Venus, patru sateliți ai lui Jupiter, și care a stabilit că de fapt Calea Laptelui este o aglomerare de stele, sînt fără îndoială mari realizări, întru nimic mai prejos în ceea ce privește importanța lor în istoria științei decît cele mai impresionante cuceriri științifice ale contemporaneității.

Așadar, particularitatea etapei actuale trebuie căutată mai ales în însuși caracterul dezvoltării astronomiei, în apariția de noi caracteristici. Într-adevăr, aceste caracteristici sînt frapante.

În antichitate, apoi în epoca lui Galilei, în secolul al XIX-lea și, de fapt, pînă în 1945, în astronomie a existat un monopol: practic era folosită o singură metodă de observare, cea optică. Explicația constă în faptul că atmosfera terestră lasă să treacă numai undele electromagnetice din spectrul optic cu o lungime de undă mai mare de 0,3 microni și mai mică de cîteva microni; cu ochiul liber putem vedea radiații cu o lungime de undă de 0,4—0,75 microni. Prin urmare, toate observațiile s-au efectuat prin această fereastră optică de transpa-

1949 și acumulate în literatura universală pînă atunci, creșterea acestui indicator avînd loc potrivit legii exponențiale. Să presupunem, de asemenea, că $T = 20$ de ani. În acest caz, în 1969 y va fi egal cu 2,72 y_0 , adică numai în ultimii 20 de ani s-au publicat de 2,72 ori mai multe articole decît în întreaga perioadă dinainte de 1949. De aici rezultă clar că majoritatea rezultatelor științifice au fost într-adevăr realizate în ultima perioadă de timp.

rență a atmosferei, ba chiar, în majoritatea cazurilor, numai în partea vizibilă a spectrului.

Or, în univers sînt emise, propagate și poartă o informație multilaterală unde electromagnetice din toate regiunile spectrului cu lungimi de undă care variază de la cîteva kilometri pînă la fracțiuni infime dintr-o miliardime de centimetru. De aceea, chiar fără o argumentare specială este evident că observarea cosmosului numai prin fereastra optică a transparenței atmosferei sărăcește considerabil imaginea.

Cea mai caracteristică și mai importantă particularitate a etapei actuale în dezvoltarea astronomiei și astrofizicii (practic ne referim la perioada de după 1945—1948) constă tocmai în apariția și folosirea pe scară tot mai largă a metodelor neoptice.

Cea mai cunoscută și importantă este metoda radioundelor, legată de folosirea ferestrei de transparență a atmosferei terestre în domeniul undelor radio. Prin această fereastră pot trece undele cu lungimi de undă de la cîteva milimetri pînă la cîteva zeci de metri. În mai puțin de două decenii radioastronomia s-a dezvoltat și s-a ramificat extraordinar, ajungînd astăzi să se dividă la rîndul ei în astronomie metagalactică și galactică, radioastronomie solară, radioastronomia Lunii și planetelor și astronomia radar.

Undele electromagnetice, care depășesc limitele ferestrelor de transparență menționate, nu ajung la suprafața Pămîntului, pentru observarea lor fiind necesar să recurgem la radiosonde, rachete și sateliți. Pînă la suprafața Pămîntului ajung, în afară de lumină și radiunde, numai meteoriții, de proveniență cosmică, neutrinii și undele gravitaționale (a căror existență rezultă din teoria relativității generalizate a lui Einstein).

Studiul meteoriților reprezintă un mijloc de cercetare cunoscut încă demult. Astăzi el trăiește o a doua tinerete ca urmare a importanțelor perfecționări ale metodelor radiochimiei generate de lucrările privind folosirea energiei nucleare.

În ceea ce privește recepționarea particulelor neutrino și a undelor gravitaționale, ea nu a fost încă realizată, dacă este să vorbim de măsurători certe.

Să enumerăm pe scurt noile metode din astronomie.

1) **Radioastronomia.** Pe Pămînt se recepționează radiații cu o lungime de undă de la cîteva milimetri pînă la zeci și

uneori sute de metri. Pe sateliți pot fi recepționate radiații cu o lungime de undă până la 1 sau câțiva kilometri. Radioastronomia cu ajutorul sateliților a și înregistrat primele succese.

2) **Astronomia optică**, bazată pe sateliți și rachete. Chiar și în limitele ferestrei optice de transparență existența atmosferei influențează negativ calitatea imaginii (care se deformează și scintilează din pricina curenților de aer etc.). Din această cauză folosirea sateliților și a rachetelor deschide mari posibilități și în fața astronomiei optice, promițând noi realizări. Afară de aceasta, prezintă un interes deosebit recepționarea radiațiilor ultraviolete și infraroșii dincolo de fereastra optică de transparență a atmosferei (astronomia în ultraviolet și în infraroșu)¹. În aceste direcții s-au și obținut unele rezultate interesante, dar se pot realiza succese incomparabil mai mari. Menționăm că în loc de sateliți artificiali poate fi folosită cu succes Luna, care este lipsită de atmosferă și din acest punct de vedere oferă condiții ideale pentru un observator astronomic.

3) **Astronomia Roentgen și astronomia gamma**. Lungimea de undă caracteristică radiațiilor Roentgen este de 10^{-8} cm = $= 1 \text{ \AA}$ (angström). Lungimea de undă a radiației gamma este și mai mică.

În acest domeniu al spectrului se manifestă cu o deosebită putere proprietățile cuantice ale radiației electromagnetice; în locul lungimii de undă este comod să caracterizăm radiația prin energia cuantelor care o compun (adică a fotonilor). Astfel, în spectrul radiațiilor Roentgen sînt incluse de obicei radiațiile ale căror fotoni au o energie între cîteva sute și multe zeci de mii de electronvolți. Fotonii cu o energie și mai mare sînt denumiți fotoni gamma. Pentru comparație menționăm că substanțele radioactive emit radiație gamma cu o energie care atinge milioane de electronvolți. Acceleratoarele moderne permit obținerea de fotoni gamma cu o energie care se măsoară în miliarde de electronvolți. Este în afară de orice îndoială că în cosmos se găsesc fotoni cu o energie și mai mare.

¹ Observațiile în domeniul radiațiilor infraroșii sînt împiedicate în special de vaporii de apă care se concentrează în straturile de jos ale atmosferei. De aceea astronomia în infraroșu se dezvoltă cu succes pe baza folosirii radiosondelor (baloanelor).

Astronomia Roentgen și gamma — cu excepția cîtorva cazuri speciale — se poate dezvolta numai pe baza folosirii rachetelor, a sateliților, ca și a baloanelor de altitudine. Radiația Roentgen a Soarelui se studiază de cîteva ani și în acest domeniu s-au obținut rezultate apreciabile. În 1962—1963 a făcut primii pași și astronomia Roentgen cosmică (nesolară). Asupra acestei noi ramuri a astronomiei ne vom opri mai pe larg ceva mai departe.

4) **Studiul radiației cosmice primare**. În afară de undele electromagnetice și de particulele fără sarcină neutrino menționate anterior, care posedă o capacitate de penetrație deosebit de mare, mai ajunge la Pămînt, „călătorind” prin cosmos, și radiația cosmică. Această radiație constă din particule rapide încărcate: protoni, nuclee ale diferitelor elemente, electroni și pozitroni. O caracteristică a radiației cosmice este energia deosebit de mare a unor particule care intră în componența ei. Astfel, s-au observat particule (protoni sau nuclee) cu o energie care atinge $10^{20} = 100$ miliarde de miliarde de electronvolți, de un miliard de ori mai mare decît energia particulelor ce se obțin în cele mai perfecte dintre acceleratoarele construite pînă în prezent.

Studiul radiației cosmice datează de aproximativ o jumătate de secol, dar abia folosirea radiosondelor, a rachetelor și a sateliților a permis cercetarea particulelor primare care vin direct din cosmos. De aceea este lesne de înțeles că astrofizica radiației cosmice, adică studiul aspectului astrofizic al problemelor privitoare la radiația cosmică¹, a început să se dezvolte relativ recent (nucleele au fost descoperite în radiațiile cosmice primare în 1948, iar pozitronii abia în 1963).

5) **Metodele directe de cercetare** cu ajutorul sateliților și al rachetelor cosmice. E vorba de măsurători făcute direct pe sateliți și rachete, de pildă măsurarea concentrării particulelor încărcate din curenții de plasmă (gaz ionizat) emiși de Soare. De aceste metode țin studiul micrometeorilor, fotografierea Lunii și a planetelor de la distanțe mici, precum și investigarea directă a suprafeței Lunii și a planetelor. Este un domeniu extrem de important și deosebit de interesant, dar, întrucît

¹ Studiul radiației cosmice prezintă un mare interes și pe alt plan: ca metodă de cercetare a particulelor elementare și a interacțiunii lor. Nu ne vom referi aici la acest aspect (denumit de obicei nuclear).

în presă au apărut numeroase materiale consacrate acestor metode, putem să nu ne oprim aici asupra lor.

Printre metodele directe putem situa de asemenea procedeele radar pentru studiul Soarelui, al Lunii și al planetelor. Această metodă, a cărei vechime nu depășește nici două decenii, a adus rezultate interesante, care de asemenea și-au găsit o reflec-tare destul de largă în presă.

6) **Astronomia neutrinelor.** Acest domeniu este de-abia în curs de afirmare, dar este de prevăzut că într-un viitor apropiat el va aduce primele rezultate, respectiv va duce la punerea în evidență a neutrinelor proveniți din Soare¹. Aceasta va per-mite să primim informații despre reacțiile nucleare care se desfășoară în interiorul Soarelui: particulele neutrino sînt emise în cursul reacțiilor care se petrec mai ales în partea cea mai fierbinte a Soarelui, partea lui centrală. Menționăm că o asemenea posibilitate de a arunca o privire cu ajutorul „telesco-pului neutrinic” în adîncul Soarelui (a cărui rază este de apro-ximativ 700 000 km) ar fi părut cu desăvîrșire fantastică nu numai în secolul trecut, dar și acum vreo trei decenii. Astăzi experiențele de acest gen sînt de domeniul realului și probabil că în curînd vor fi efectuate.

Este de așteptat ca în viitor să se deschidă de asemenea posibilitatea de a recepționa unde gravitaționale de origine cosmică. În 1969 a și apărut o știre despre descoperirea unei puternice radiații gravitaționale, dar deocamdată nu putem în nici un caz considera această concluzie ca fiind bazată pe date sigure.

După cum am mai subliniat, timp de milenii sau de secole, dacă ne referim la perioada inaugurată cu investigațiile lui Galilei, toate cunoștințele despre univers, despre cosmos erau obținute numai cu ajutorul aparatelor situate pe Pămînt și — într-o măsură mică — cu ajutorul datelor oferite de meteo-riți.

De aceea, apariția simultană în decursul unei perioade scurte — în ultimele două-trei decenii — a mai multor metode, variate și esențialmente noi, reprezintă o adevărată revoluție în as-tronomie.

¹ Experiențele au arătat că neutrinii proveniți din Soare par a fi produși într-un număr mai redus decît se credea (N.T.).

Această revoluție este întru totul comparabilă în ceea ce pri-vește importanța ei cu cea legată de trecerea de la observațiile făcute cu ochiul liber la folosirea de telescoape optice.

Ca orice alt proces revoluționar, apariția și dezvoltarea noi-lor metode astronomice nu este lipsită de dificultăți la care ne vom mai referi la sfîrșitul acestui capitol. Deocamdată am dori doar să menționăm că nici un fel de metode noi în astronomie nu pot diminua importanța metodei optice clasice. Astrono-mia optică terestră nu stă, bineînțeles, pe loc, ci se perfecțio-nează în raport cu progresul rapid al electronicii moderne și în general al întregii fizici și tehnici contemporane.

Așadar noua etapă în dezvoltarea astronomiei nu constă în renun-țarea la folosirea telescoapelor optice, ci în imbinarea lor cu radio-astronomia, cu astronomia în ultraviolet, cu astronomia Roent-gen și gamma, cu metodele fizicii radiației cosmice și a particu-lelor neutrino, cu procedeele radar cosmice, cu măsurătorile directe efectuate de pe sateliți și rachete, precum și cu măsurăto-rile directe efectuate pe Lună și pe diverse planete.

Noi rezultate ale cercetărilor astrofizicii

Noile metode utilizate în astronomie nu numai că par deose-bit de promițătoare, dar au și dat unele rezultate de semnificație fundamentală.

Exemple pregnante sînt descoperirea radiogalaxiilor (adică a unor aglomerări de sute de milioane și chiar de multe miliarde de stele care emit, în domeniul radio, radiații deosebit de puter-nice), a quasariilor (surse cvasistelare) și a pulsariilor, a radia-țiilor în domeniul radio și a radiațiilor Roentgen provenite din anvelopele supranovelor, cercetarea radiației termice rema-nente din cosmos cu o temperatură de 2,7°K și a radiației pro-venite de la hidrogenul neutru din univers, descoperirea și studiul radiației solare în domeniul radio, deosebit de variată în formele ei, ca și a neomogenității densității norilor de plasmă interplanetară.

Trebuie să menționăm de asemenea descoperirea și cercetarea radiațiilor în domeniul radio emise de Lună, de Jupiter, de Venus și de alte planete, realizarea radiolocației Soarelui, Lunii și a planetelor, clarificarea rolului important al radiației cosmice în univers, realizarea unor fotografii ale părții ascunse și ale celei vizibile ale Lunii și ale lui Marte, luate de la distanță mică. Dintre realizările științifice cele mai remarcabile face parte, fără îndoială, și aducerea pe Pământ a unor eșantioane de roci selenare.

Tuturor problemelor menționate mai sus le sînt consacrate numeroase (sute, uneori chiar mii) de articole; într-o serie de cazuri ele au făcut obiectul unor ample monografii.

Aici ne vom mărgini doar să enunțăm cîteva considerații referitoare la rezultatele obținute și la importanța lor.

Pentru ca să ne fie clară importanța studiului universului dincolo de cadrul aspectului optic, să ne imaginăm „tabloul” radioelectric al cerului. Astfel, diametrul Soarelui în unde radio metrice depășește considerabil diametrul lui „optic” și, ceea ce este mai important, strălucirea radio a Soarelui are puternice oscilații: uneori ea crește sau se micșorează în proporție de sute de mii de ori. Dimpotrivă, variațiile în strălucirea luminii emise de Soare sînt extrem de mici și pot fi observate numai cu ajutorul unor măsurători speciale, pe baza observării diverselor linii spectrale emise de atmosfera solară.

Diferența dintre tabloul optic și cel radio al Soarelui se explică prin faptul că undele radio metrice sînt emise de coroana solară — partea superioară a atmosferei solare, deosebit de rarefiată și expusă la perturbații — care poate fi văzută cu ochiul liber numai în timpul eclipselor totale de Soare.

Cu toate că exemplul Soarelui arată destul de concludent cît de mult diferă observațiile optice de cele radio, această deosebire se manifestă și mai pregnant cînd cercetăm alte obiecte astronomice.

Unele surse care cu greu pot fi fotografiate cu ajutorul celor mai puternice telescoape rivalizează, în ceea ce privește intensitatea radiațiilor, cu Soarele. Astfel este în domeniul radio, de pildă radiosursa Casiopeea A, care reprezintă anvelopa unei supranove apărute în sistemul stelar reprezentat de Galaxia noastră cu aproximativ 250 de ani în urmă. Distanța pînă la

sursa Casiopeea A este de aproximativ 10 000 de ani-lumină¹, în timp ce lumina ajunge de la Soare la Pământ numai în 8 minute.

O altă radiosursă care rivalizează cu Soarele în ceea ce privește intensitatea radio este Lebăda A, care reprezintă o galaxie îndepărtată, aflată la o distanță de aproximativ 600 milioane de ani-lumină de noi. Sursa Lebăda A este una dintre destul de numeroasele radiogalaxii răspindite în univers.

Deosebirea dintre radiogalaxii și galaxiile normale va deveni mai clară dacă vom arăta că Galaxia noastră, care este o galaxie normală, și radiogalaxia Lebăda A emit o cantitate de lumină aproximativ egală, în timp ce intensitatea emisiunii radio este în cazul Lebedei A de un milion de ori mai mare decît în cazul Galaxiei noastre.

Descoperirea radiogalaxiilor (care datează din anii 1946—1953) a arătat că în lumea galaxiilor au loc și în epoca noastră procese explozive vehemente, care constituie sursa apariției unei puternice emisiuni radio.

Acum cîteva ani a fost evidențiată o clasă specială de radiosurse extragalactice de dimensiuni relativ mici. S-a constatat că aceste radiosurse au în partea lor centrală puternice surse optice de un tip nou, care au căpătat denumirea de suprastele, evasistele sau quasari. Cea mai apropiată dintre sursele de acest tip, care figurează în cataloage ca sursa 3C 273-B, se află la o distanță de 1,5 miliarde de ani-lumină de noi, dar pe fotografiile cerului se prezintă ca o stea destul de luminoasă. S-a putut constata că aceasta este cea mai puternică dintre toate sursele cunoscute în univers. Ea emite de 100 de ori mai multă lumină vizibilă decît întreaga noastră Galaxie, care include sute de miliarde de stele. Descoperirea quasariilor, a căror natură încă nu a fost definitiv lămurită, a fost considerată în unanimitate cel mai mare eveniment științific din anul 1963.

În anul 1965 a fost descoperită emisiunea radio termică remanentă din cosmos. Această radiație a fost generată cu aproximativ 10 miliarde de ani în urmă, cînd densitatea substanței

¹ Anul-lumină este distanța parcursă de lumină într-un an, egală cu aproximativ 10^{18} cm = 10^{13} km. Distanța de la Pământ la Soare este de $1,5 \cdot 10^8$ km sau 8 minute-lumină; distanța de la noi pînă la steaua cea mai apropiată de Soare, situată în constelația Centaurului, este de aproximativ 4 ani-lumină.

din univers era în medie de 1 miliard de ori mai mare decât în prezent.

În 1968 au fost descoperite radiosurse remarcabile de un tip nou: pulsarii. Probabil că aceștia reprezintă niște stele neutronice cu un câmp magnetic puternic.

Alte descoperiri legate de folosirea noilor metode în astronomie nu egalează prin amploarea și semnificația lor pentru cunoașterea universului descoperirea radiogalaxiilor, a quasarelor, a pulsarilor și a emisiunii radio remanente. Dar această concluzie nu face decât să sublinieze importanța deosebită a acestor din urmă descoperiri, fără să diminueze rolul celorlalte. Dacă Galilei a descoperit cei patru sateliți mai luminoși ai lui Jupiter, astăzi astronomia a reușit să descopere intensă emisiune radio a lui Jupiter și existența în jurul lui a unei zone puternice de radiație asemănătoare centurilor de radiații ale Pământului, descoperite cu ajutorul sateliților artificiali.

De la Newton pînă nu demult s-a considerat că în univers au un rol practic numai forțele de gravitație. Astăzi metodele radioastronomiei și ale fizicii radiației cosmice demonstrează că în cosmos au o importanță esențială, și uneori chiar determinantă, presiunea radiației cosmice și aceea a câmpului magnetic. Radiația cosmică și câmpurile magnetice au un rol important în univers și din punct de vedere energetic.

Din păcate, nu ne putem opri amănunțit asupra tuturor celorlalte realizări enumerate de noi mai sus (vom face parțial acest lucru în capitolele următoare). Sperăm însă că eficiența și importanța noilor metode ale astronomiei reiese destul de clar și din exemplele citate. Afară de aceasta, în următoarele două paragrafe ale acestui capitol ne vom opri, pentru ilustrare, asupra astrofizicii radiației cosmice și asupra uneia dintre problemele cele mai interesante, problema stelelor neutronice și a posibilității descoperirii lor prin metodele astronomiei Roentgen.

Astrofizica radiației cosmice

Din ce este alcătuit cosmosul, care sînt principalele elemente ale universului? Cu puțini ani în urmă, cei mai mulți dintre astronomi și dintre ceilalți oameni de știință ar fi răspuns la această întrebare precum urmează: universul este alcătuit din stele care

se grupează în galaxii, din gaz interstelar și intergalactic și dintr-o fază solidă: planetele, pulberea cosmică etc. S-ar fi putut de asemenea menționa radiația electromagnetică. La aceste „elemente”, astăzi trebuie să adăugăm neapărat radiația cosmică.

Noul nu constă aici în afirmarea existenței radiației cosmice care se propagă prin spațiul interastral. Faptul acesta este cunoscut de cîteva decenii. Pînă nu demult însă radiația cosmică era considerată ca un fenomen secundar, de importanță minoră pentru astronomie în ansamblul ei. Or, s-a ajuns la concluzia că aceasta era o eroare.

În primul rînd radiația cosmică, generarea și acumularea ei reprezintă un fenomen cosmic universal: se formează și în Soare și, incontestabil, în toate stelele sau în majoritatea lor. Ea apare în cantități imense cu prilejul izbucnirii supernovelor și apoi se menține parțial în anvelopele gazoase în expansiune care se formează cu prilejul izbucnirii supernovelor. O cantitate și mai mare de radiație cosmică este prezentă în galaxii, și în special în radiogalaxii, unde nașterea lor este legată de producerea unor explozii în nucleeele galactice.

În al doilea rînd, radiația cosmică reprezintă o prezență importantă în univers, în sensul că, după cum s-a mai spus, energia și presiunea ei au un rol substanțial și determină, de pildă, într-o măsură considerabilă, energia și dinamica disipării anvelopelor supernovelor, a norilor radioemitori din radiogalaxii etc.

În cosmos există câmpuri magnetice (ceea ce s-a demonstrat prin diferite metode, între altele, în spațiul interplanetar pe bază de măsurători directe făcute cu ajutorul rachetelor cosmice). Aceste câmpuri sînt slabe: valoarea caracteristică a câmpului în spațiul interstelar reprezintă a suta mia parte dintr-un oersted (câmpul magnetic terestru la pol este egal cu aproximativ 0,5 oersted). Se poate spune însă că valoarea mică a câmpurilor interstelare este compensată de uriașa lor întindere. De pildă, în Galaxia noastră, distanța caracteristică la care câmpul suferă o modificare substanțială se cifrează în medie la cîteva zeci de mii de ani-lumină. Pentru a înțelege cum acționează un asemenea câmp asupra particulelor încărcate trebuie să comparăm dimensiunile menționate ale câmpului cu raza traiectoriilor unei particule în acest câmp. După cum se știe, o particulă încărcată se mișcă într-un câmp magnetic pe o linie elicoidală, iar dacă viteza ei este riguros perpendiculară

lară pe câmpul magnetic, ea se mișcă pe un cerc. Raza acestui cerc este în cazul protonilor și al electronilor $R = E/300H$ cm, unde H este intensitatea câmpului magnetic în oerstezi, iar E — energia particulei în electronvolți (se presupune că particula este „ultrarelativistă”, ceea ce înseamnă că viteza ei este foarte apropiată de viteza luminii sau, cu alte cuvinte, că energia ei $E \gg Mc^2$, unde M este masa de repaus a particulei, iar c — viteza luminii). Într-un câmp cu o intensitate $H \approx 10^{-5}$ oerstezi, pentru particulele tipice ale radiației cosmice (protoni și nuclee) cu o energie $E \approx 10^{10} \dots 10^{11}$ eV, raza $R \approx 10^{13}$ cm, adică este de ordinul distanței de la Pământ la Soare. Pe de altă parte, după cum s-a arătat mai sus, dimensiunile câmpurilor magnetice cosmice în Galaxie sînt de milioane de ori mai mari, din care cauză acțiunea câmpului interstelar asupra radiației cosmice nu numai că nu este mică, ci, dimpotrivă, este foarte mare¹.

Mișcarea particulelor din radiația cosmică în câmpurile magnetice interstelare, care la scara întregii Galaxii pot fi considerate neordonate, haotice, face ca radiațiile cosmice să se „amestece”. Ca urmare, radiațiile cosmice ajung la Pământ (sau mai exact la sistemul solar) în cantități egale din toate părțile sau, cum se mai spune, radiația cosmică este izotropă (anizotropia fluxului de radiație cosmică încă nu este cu certitudine stabilită și în orice caz nu depășește fracțiuni de procent).

Izotropia radiației cosmice are ca evidentă consecință faptul că studierea radiației cosmice în afara atmosferei terestre (și chiar la periferia sistemului solar) nu ne permite să obținem informații directe despre sursele acestei radiații, despre locul unde se află aceste surse și despre ceea ce reprezintă ele. De aceea studiul radiației cosmice prin metode fizice (sonde, sateliți și rachete) este încă, desigur, insuficient, cu toate că are un rol foarte apreciabil. Concret, pe această cale putem afla com-

¹ Avem aici un exemplu, caracteristic pentru științele naturii, al faptului că în sine valorile unor mărimi, fără să fie raportate la alte mărimi, nu pot fi considerate mari sau mici. La fel câmpul magnetic terestru (fracțiuni de oersted) este foarte mic în comparație cu câmpurile puternice folosite astăzi în laboratoare, câmpuri a căror intensitate se măsoară în sute de mii de oerstezi; dar același câmp terestru este mare (puternic) cînd este vorba de folosirea busolei sau de propagarea deasupra Pământului a radiounделor cu o lungime de undă mai mare, bunăoară de 100 m etc.

ponența chimică a radiației cosmice (fluxurile de protoni și de diverse nuclee), numărul de electroni și pozitroni și spectrul energetic al tuturor acestor particule, adică dependența fluxului lor de energie. Aceste informații sînt, bineînțeles, foarte importante.

S-a constatat, de pildă, că în radiația cosmică se găsește destul de multe nuclee ale elementelor ușoare: litiu, beriliu și bor. Fluxul acestor trei tipuri de nuclee este în ansamblu aproximativ egal cu fluxul tuturor nucleelor relativ grele care își au locul în tabelul periodic de elemente după nucleele de carbon, azot, oxigen și fluor. Pe de altă parte, în univers cantitatea totală de litiu, beriliu și bor este în medie de 100 000 de ori mai mică decît cea de elemente grele. Acest fapt curios se explică în felul următor: în drumul lor de la surse la Pământ, radiațiile cosmice nu se deplasează în vid, ci în mediul interstelar, străbătînd un strat de gaze (în cea mai mare parte hidrogen) cu o masă de $2 \dots 10$ g/cm² (ceea ce înseamnă că o coloană de gaz cu o secțiune de 1 cm² are o masă egală cu $2 \dots 10$ g). Ca urmare a interacțiunii nucleelor mai grele care intră în componența radiației cosmice cu nucleele atomilor din mediul interstelar se formează nuclee fragmentate, în special nuclee de litiu, beriliu și bor. Așadar compoziția chimică a radiațiilor cosmice oglindește istoria călătoriilor lor și studiul acestei compoziții ne oferă într-adevăr o informație de preț.

Cu toate acestea, studiul radiației cosmice nu ar forma un întreg capitol al astrofizicii contemporane (cel pe care-l numim „astrofizica radiației cosmice”) dacă astronomii ar dispune pentru cercetarea acestei radiații numai de metode fizice (avem în vedere înregistrarea radiației cosmice primare în apropierea Pământului cu ajutorul emulsiilor fotografice, a diverselor contoare etc.).

Din fericire, există o posibilitate (a cărei importanță ar fi greu s-o apreciem la justa ei valoare) de a studia radiațiile cosmice care se află nu numai în colțurile îndepărtate ale Galaxiei noastre, dar și departe, dincolo de limitele ei, și chiar și dincolo de limitele de vizibilitate ale celor mai puternice telescoape. Este vorba de radioemisiunea cosmică receptată cu ajutorul radiotelescoapelor. Ea este generată în cea mai mare parte de radiațiile cosmice, mai precis de componenta lor electronică.

Am mai spus că în câmpul magnetic particulele încărcate sînt antrenate într-o mișcare turbionară; mișcarea lor într-un

asemenea câmp nu este rectilinie, ci accelerată. Dar o mișcare accelerată a sarcinii electrice are ca urmare emiterea de radiații electromagnetice. Această radiație, care apare atunci când particulele se mișcă într-un câmp magnetic, se numește *radiație de frinare magnetică* (când e vorba de particule ultrarelativiste, o asemenea radiație se numește, de obicei, *sincrotronă*).

După cum s-a constatat, pentru electronii cu energia caracteristică radiației cosmice $E \approx 10^8 - 10^{10}$ eV, atunci când ei se deplasează în câmpurile magnetice interstelare cu o intensitate $H \approx 10^{-6} - 10^{-5}$ oerstezi, radiația de frinare magnetică se situează în esență tocmai în domeniul undelor radio de ordin metric, folosite pe o scară deosebit de largă în radioastronomie. În felul acesta, radioastronomia și astrofizica radiației cosmice sînt strîns legate între ele. Întrucît undele radio cu lungime metrică se propagă în cosmos practic fără obstacole și rectiliniu, cu ajutorul lor putem afla cîți electroni cu energie mare se găsesc într-un înveliș sau altul al unei supranove, în Galaxie etc. Tocmai observațiile radioastronomice au permis oamenilor de știință să tragă concluzia că radiația cosmică, sau cel puțin componenta ei electronică, este prezentă în cele mai diverse regiuni ale universului.

Nu trebuie să credem însă că radiația cosmică ne dă de veste despre existența ei numai prin intermediul undelor radio. Cu toate că radiația din domeniul radio ocupă incontestabil primul loc în ceea ce privește volumul și valoarea informației furnizate, trebuie să subliniem că mai există și alte posibilități.

Astfel, în unele condiții (dacă câmpul magnetic este suficient de puternic sau dacă există electroni cu o foarte mare energie), radiația de frinare magnetică ajunge în domeniul optic sau chiar în domeniul Roentgen al lungimilor de undă (vezi paragraful următor).

Afară de aceasta, ca urmare a unei serii întregi de procese pe care le implică interacțiunea radiației cosmice cu mediul (gazul) interstelar și cu radiația optică interstelară (emisă de stele) iau naștere radiații gamma.

Radiațiile gamma cosmice se propagă în general rectiliniu și aproape fără absorbție. De aceea, la fel ca undele radio, ele ne pot furniza informații despre radiațiile cosmice care le generează. Studiul radiației gamma cosmice, care constituie obiectul astronomiei gamma, se află de fapt la începuturile sale,

dar pare deosebit de promițător. Pe de altă parte, studiul radiației Roentgen cosmice a realizat de pe acum progrese importante.

Investigația complexă, adică folosirea tuturor metodelor accesibile, procedeu atît de caracteristic pentru știința contemporană, a permis acumularea unui material bogat cu privire la radiația cosmică din univers. Și, așa cum se întîmplă de obicei cînd e vorba despre un domeniu cu adevărat important și vast, în pofida belșugului de noi informații, în locul unor probleme rezolvate apar mereu altele nu mai puțin interesante. Să ne referim doar la faptul că astăzi în astrofizica radiației cosmice se pun cu o deosebită acuitate problema radiației cosmice din spațiul intergalactic (adică aflat între galaxii), problema celei din quasari și radiogalaxii, problema accelerației radiației cosmice în atmosfera pulsarilor; se pune de asemenea problema rolului care le revine fenomenelor specifice plasmei¹ în ce privește înțelegerea comportării radiației cosmice.

Stelele neutronice și astronomia Roentgen

Încă cu vreo trei decenii în urmă s-a presupus că este posibilă existența unor stele neutronice, adică a unor stele formate în esență numai din neutroni². Această presupunere a apărut ca urmare a analizei evoluției stelelor.

După cum se știe, stelele luminează datorită energiei care se degajă cu prilejul reacțiilor nucleare ce au loc în interiorul lor. Ca urmare a arderii combustibilului nuclear, steaua în cele din urmă se comprimă. Dar destinul ei nu este univoc și depinde atît de masa stelei în momentul cînd s-a consumat combustibilul nuclear, cît și de caracterul ultimei faze a acestui proces. Dacă masa stelei M este mai mică decît aproximativ $1,2 M_s$ (unde $M_s = 2 \cdot 10^{33}$ g este masa Soarelui), iar pro-

¹ Gazul interstelar și intergalactic este ionizat, adică se află în stare de plasmă. Comportarea particulelor încărcate rapide care se mișcă în plasmă prezintă o serie de particularități în comparație cu mișcarea particulelor de acest fel într-un mediu neionizat.

² Amintim că nucleeele atomice sînt compuse din protoni și neutroni.

cesul de ardere a combustibilului nuclear și de comprimare a stelei se desfășoară lent, astrul se transformă într-o stea densă care poartă denumirea de *pitică albă*. Asemenea stele sînt alcătuite din plasmă foarte puternic comprimată (nuclee atomice și electroni). Densitatea substanței în centrul piticelor albe este de ordinul a $10^6 \dots 10^{10} \text{ g/cm}^3$ (ea este cu atît mai mare cu cît masa stelei este mai apropiată de masa limită sau masa critică, egală aproximativ cu $1,2 M_s$). Cît despre Soare, chiar în centrul lui densitatea este de ordinul a 100 g/cm^3 .

Forțele gravitaționale tind să comprime steaua. Li se opun presiunea plasmăi (substanța stelei) și presiunea radiației. În stelele „obișnuite“ are loc în permanență sinteza nucleară: se desfășoară reacții nucleare care încălzesc steaua și în special zona ei centrală. Ca urmare se creează un decalaj de presiuni atît de considerabil încît forțele gravitaționale nu pot comprima steaua pînă la dimensiuni cu totul mici. Dar pe măsura arderii combustibilului nuclear și a răcirii stelei, comprimarea crește și se ajunge la uriașele densități menționate (chiar în cazul piticelor albe mai puțin dense este vorba de o comprimare care face ca 1 cm^3 de substanță stelară să aibă o greutate de o tonă). Se poate pune problema de ce nu se comprimă steaua și mai mult atunci cînd răcirea continuă. Explicația constă în faptul că în cazul densităților mari se manifestă simțitor legile cuantice, care „interzic“ electronilor să se apropie prea mult de nucleele atomice. De fapt, tocmai din această pricină există atomi stabili, în care electronii nu cad pe nucleu¹.

Dar pentru stelele „pitice albe“ cu o masă care depășește masa critică de aproximativ $1,2 M_s$ nici chiar presiunea „de zero“ nu mai poate învinge forțele gravitaționale care comprimă steaua. Dacă masa ei M este mai mică decît aproximativ $2 M_s$, steaua, comprimîndu-se, se transformă într-o stea neutronică. De altfel, steaua neutronică poate să aibă o masă mai mică decît masa critică, respectiv $1,2 M_s$. În acest caz pitica albă și steaua neutronică reprezintă două stări posibile și diferite ale echilibrului stelelor. La care anume din aceste două stări

¹ Pentru cei care cunosc elementele teoriei cuantice, notăm că este vorba de „energia de zero“ și de principiul lui Pauli. Ca urmare, chiar la o temperatură egală cu zero absolut gazul electronic are o energie cinetică și o presiune diferită de zero. Tocmai datorită acestei presiuni este echilibrată forța de gravitație în piticele albe.

ajunge ea este un lucru care depinde de caracterul stelei în curs de răcire. După cum s-a mai menționat, în cazul răcirii și comprimării lente (dacă un asemenea proces este posibil) se formează o pitică albă. Dacă însă combustibilul nuclear din stea arde prea repede, ea își pierde stabilitatea și explodează. Ca urmare, se poate forma ca „rămășiță“ o stea neutronică (desigur, cu condiția ca masa ei să fie mai mică de $2 M_s$). Pentru stelele cu o masă mai mare de $2 M_s$ nu există o stare de echilibru stabil la temperaturi joase și ele se comprimă nelimitat (are loc fenomenul de prăbușire gravitațională sau colaps).

În acest capitol ne interesează numai stelele neutronice, așa că nu vom vorbi despre alte produse ale evoluției stelelor. Este cazul să precizăm că în procesul formării stelelor neutronice protonii p se combină cu electronii e^- și, emițînd o particulă neutrino ν , se transformă în neutroni n (are loc procesul $p + e^- \rightarrow n + \nu$). În stare neutronică, o stea are o densitate aproximativ egală cu a nucleelelor atomice, respectiv densitatea ei medie este egală cu $10^{14} \text{ g/cm}^3 = 100\,000\,000 \text{ t/cm}^3$. De aceea, dacă o stea cu masa Soarelui trece în stare neutronică, ea va avea o rază de numai 10 km, în timp ce raza fotosferei solare vizibile pentru ochi este de 700 000 km (densitatea medie a Soarelui fiind egală aproximativ cu densitatea apei, adică cu 1 g/cm^3).

Cantitatea de lumină emisă de o stea este proporțională cu suprafața ei, respectiv cu pătratul razei. Dacă Soarele s-ar transforma într-o stea neutronică (proces cu totul imposibil în stadiul actual), ea ar emite o cantitate de lumină de miliarde de ori mai mică, temperatura suprafeței (a fotosferei) rămînînd neschimbată. Tocmai de aceea mult timp s-a considerat că observarea stelelor neutronice este imposibilă, cu excepția cazului cînd printr-un miracol o asemenea stea s-ar găsi la o distanță foarte mică de noi.

S-a creat astfel o situație paradoxală: pe de o parte apăruse o ipoteză deosebit de interesantă și importantă pentru astrofizică, iar pe de altă parte nu exista decît o speranță minimă de a o verifica.

În ultimii ani s-a văzut însă că aceste temeri erau neîntemeiate.

Într-adevăr, în procesul de formare a unei stele neutronice are loc o încălzire și cîtva timp o asemenea stea poate foarte

bine să ajungă mai caldă decât fotosfera solară, a cărei temperatură este de $6\,000^{\circ}\text{C}$. Dar cu cât un corp este mai cald, cu atât el radiază mai puternic: în cazul echilibrului termic, energia radiației electromagnetice este proporțională cu T^4 , unde T este temperatura suprafeței. De asemenea, cu cât un corp este mai cald, cu atât mai mici sînt lungimile de undă ale radiației pe care o emite cu precădere, așa încît pentru punctul maxim al spectrului produsul dintre lungimea de undă λ și temperatura T este constant (legea deplasării a lui Wien). Este lesne de înțeles că o stea cu o temperatură de $10\,000\,000^{\circ}$ va emite mai mult radiații Roentgen¹. Puterea acestei radiații este atât de mare încît „telescoapele Roentgen” existente ne-ar permite să observăm o stea neutronică aflată la o distanță de mii de ani-lumină.

Această posibilitate a atras cu cîțiva ani în urmă atenția astronomilor și fizicienilor din numeroase țări, în primul rînd datorită faptului că în 1962—1963 a fost descoperită radiația Roentgen cosmică (nesolară) și s-a stabilit existența unor surse puternice și discrete (adică distincte pe sfera cerească) ale acestei radiații.

Cea mai puternică sursă Roentgen (stea Roentgen) se află în constelația Scorpionului. Din aproximativ patruzeci de surse mai slabe cunoscute, atrage o atenție deosebită sursa aflată în constelația Taurul, unde se află și vestita nebuloasă a Crabului, rămasă a supranovei apărute în 1054. Nu cumva stelele Roentgen sînt niște stele neutronice calde? La prima vedere s-ar părea că această ipoteză poate fi ușor verificată. Stelele neutronice sînt atât de mici încît o sursă Roentgen legată de ele ar trebui să pară punctuală chiar în cazul celei mai mari puteri de rezoluție. Afară de aceasta, spectrul de frecvențe al radiației termice este binecunoscut și de aceea, în principiu, se poate preciza dacă o sursă este termică (radiația stelelor neutronice trebuie să fie în cazul cel mai simplu termică). Nu trebuie însă să uităm scăderile astronomiei Roentgen, domeniu încă tînăr. Instrumentele existente încă nu pot realiza o analiză spectrală detaliată a radiației emise de o asemenea

¹ În spectrul solar maximul corespunde unei cu o lungime de $5\,000\text{ \AA}$. De aceea în cazul temperaturii $T = 10^7^{\circ}\text{C}$ maximului din spectru îi va corespunde lungimea de undă egală cu $5\,000 \cdot 6\,000/10^7 = 3\text{ \AA}$ (amintim că $1\text{ \AA} = 10^{-8}\text{ cm}$).

stea, iar puterea de rezoluție este de fapt, pentru astronomia Roentgen, călefiul lui Ahile.

Astronomia optică nu asigură de obicei o putere de rezoluție mai bună de o secundă (sub un asemenea unghi se vede o cutie de chibrituri de la o distanță de aproximativ 10 km). În radioastronomie, slaba putere de rezoluție a constituit mult timp un obstacol serios și de-abia recent s-a realizat o putere de rezoluție de ordinul sutimilor de secundă (după cum se vede, radioastronomia a devansat cu mult în această privință astronomia optică). Din păcate, puterea de rezoluție a „telescoapelor Roentgen” folosite, care la început era de cîteva grade, astăzi nu este mai bună de 1 minut și numai în cîteva cazuri s-a putut ajunge la 10 secunde¹. În felul acesta nici nu se poate vorbi de determinarea directă a dimensiunilor unghiulare ale surselor Roentgen dacă ele sînt mai mici de 1 minut.

Totodată este foarte greu să se identifice o sursă Roentgen cu un obiect vizibil. Astfel, îndată după detectarea sursei Roentgen din constelația Taurului părea foarte probabil că ea va coincide cu nebuloasa Crabului. Dar dimensiunea unghiulară a acestei nebuloase este egală cu aproximativ 5 minute, pe cînd precizia localizării sursei în primele experiențe nu era mai bună de cîteva grade, deci de cîteva zeci de ori mai mică decât cea necesară pentru identificarea sursei Roentgen cu nebuloasa Crabului. Și mai puțin clară a rămas problema naturii sursei: putea fi vorba de o stea neutronică situată în nebuloasa Crabului, dar tot atât de bine putea să fie și o sursă cu dimensiuni apreciabile, legată de aceeași nebuloasă. Această captivantă problemă a putut fi rezolvată cu ajutorul Lunii.

La 7 iulie 1964, nebuloasa Crabului era eclipsată de Lună (adică discul lunar o ascundea observatorilor de pe Pămînt). În acel timp fizicienii americani au reușit să trimită în cosmos o rachetă cu contoare Roentgen, care au arătat că semnalul provenit de la sursa Roentgen începe să slăbească tocmai în momentul eclipsării nebuloasei Crabului. Fenomenul cel mai important însă era că puterea de recepție (numărul fotonilor Roentgen înregistrați într-o unitate de timp) nu scădea brusc, ci treptat, pe măsura acoperirii nebuloasei. Faptul acesta arată cu certi-

¹ Este vorba de astronomia Roentgen nesolară. În cazul Soarelui s-a putut obține în 1968 o fotografie prin intermediul razelor Roentgen cu o rezoluție de $2''$.

tudine că sursa Roentgen din nebuloasa Crabului nu este o stea neutronică (o asemenea stea, date fiind dimensiunile ei unghiulare infime, ar fi eclipsată instantaneu, adică puterea de recepție ar scădea brusc pînă la 0)¹.

După toate probabilitățile, radiația Roentgen din nebuloasa Crabului, asemenea radiației din domeniul radio și celei mai mari părți a radiației optice a acestei nebuloase, are o natură electromagnetică. Ea se naște prin accelerarea electronilor rapizi care apare atunci cînd ei se mișcă într-un cîmp magnetic. Confirmarea definitivă a acestei presupuneri va fi posibilă numai în urma unei cercetări mai amănunțite, în special prin determinarea spectrului radiației sau prin observarea polarizării ei. Dar oricare va fi răspunsul, descoperirea radiației Roentgen provenite din anvelopa unei supranove are o importanță imensă.

Cu toate că sursa Roentgen din nebuloasa Crabului, în ansamblu nu s-a dovedit a fi o stea neutronică, încă nu poate fi considerată respinsă ideea însăși a posibilității de a observa stelele neutronice cu ajutorul radiației Roentgen pe care ele o emit. Ce-i drept, după cum se constată astăzi, stelele neutronice par să treacă într-o stare specială suprafluidă, ceea ce trebuie să ducă la răcirea lor mai rapidă. Există și alte temeuri de a considera că faza caldă a existenței stelelor neutronice are o durată foarte scurtă. Din această cauză poate că o stea neutronică îndepărtată nu va putea să fie observată (chiar în domeniul Roentgen) decît timp de cîtiva ani, de cîteva luni sau numai zile după formarea ei. Pe de altă parte, în unele condiții (de pildă cînd o stea neutronică este înconjurată de o cantitate su-

¹ Din păcate, metoda eclipsării surselor de către Lună este foarte limitată. În primul rînd Luna poate să acopere doar o parte din bolta cerească (e vorba de observații făcute în apropierea Pămîntului); în al doilea rînd, chiar dacă eclipsarea este posibilă, ea se produce foarte rar. De pildă, nebuloasa Crabului va mai fi acoperită de Lună în anul 1972. Pînă atunci telescoapele Roentgen vor fi probabil substanțial perfecționate și, afară de aceasta, se vor putea face observații Roentgen cu ajutorul unor rachete cu rază mare, a căror folosire va permite realizarea eclipsării unor surse de către Lună după dorința noastră. (Pentru orice sursă există, evident, o regiune din spațiu în care această sursă este acoperită de Lună). Menționăm că în 1969, în nebuloasa Crabului a fost detectată, de asemenea, o sursă punctuală de raze Roentgen (un pulsar Roentgen; vezi lămuriri mai jos, ca și în penultimul studiu din prezenta culegere).

ficient de mare de gaz sau cînd alături de ea se află o altă stea, adică atunci cînd ele sînt îngemănate sau formează, cum se spune, o stea dublă), stelele neutronice pot suferi o încălzire suplimentară ca urmare a contactului cu jeturile de gaz, rămînînd în consecință calde un timp îndelungat.

Așadar ideea posibilității de a observa stelele neutronice pe baza radiației Roentgen emise de ele nu este în nici un caz discreditată. Nu este exclus ca unele „stele Roentgen“ deja descoperite să fie stele neutronice. Dar poate că meritul descoperirii stelelor neutronice care, după cum se părea pînă în 1968, trebuia să revină tocmăi astronomiei Roentgen, trebuie să fie atribuit acum radioastronomiei. Avem în vedere descoperirea pulsarilor, care, după cum se consideră astăzi, sînt niște stele neutronice.

Mai exact, poate că nu este vorba despre toți pulsarii, ci numai despre unii din ei (ceilalți pot fi, în principiu, pitice albe, ceea ce însă nu prea este verosimil). Afară de aceasta, trebuie făcută o precizare și mai importantă: dacă pulsarii sînt stele neutronice, cel mai probabil este că sînt stele neutronice de un anumit tip (vezi ultimul capitol din prezenta culegere). Oricum ar fi, descoperirea pulsarilor nu a făcut să slăbească cîtusi de puțin interesul pentru astronomia Roentgen și nici pentru posibilitatea de a cerceta cu ajutorul ei stelele neutronice calde. Această concluzie rămîne în vigoare și după descoperirea, în ianuarie 1969, a unui pulsar optic. Într-adevăr, s-a constatat că pulsarul NP 0532, situat în nebuloasa Crabului și descoperit la sfîrșitul anului 1968 datorită undelor radio pe care le emite, este vizibil și în domeniul optic al spectrului. Mai precis, încă mai demult, în nebuloasa Crabului s-a descoperit o stea mică și slabă care și în trecut (începînd cu 1952) era considerată o rămășiță posibilă a supranovei din 1054 (anul cînd a izbucnit supranova care a dus la formarea acestei nebuloase). Astăzi a reieșit că tocmăi radiația optică a acestei stele pulsează, adică prezintă foarte scurte izbucniri de lumină (cu o durată de miimi de secundă), izbucniri care se succed la intervale de 0,033 s).

În aprilie 1969 s-a stabilit că pulsarul NP 0532 este, de asemenea, sursa unei radiații Roentgen, care pulsează cu o perioadă egală cu aceea a radiațiilor de alte lungimi de undă. În felul acesta a fost descoperit primul pulsar Roentgen. Fluxul radiației sale pulsatoare Roentgen reprezintă 5...15%

din întregul flux al radiației Roentgen a nebuloasei Crabului; restul radiației Roentgen al acesteia nu pulsează.

S-a menționat mai sus imposibilitatea practică de a observa o stea neutronică în domeniul optic. Prin aceasta am avut însă în vedere, după cum rezultă chiar din argumentarea adusă, radiația termică (de echilibru) a fotosferei stelei neutronice, analogă radiației optice a Soarelui. În această privință, concluzia trasă rămâne în vigoare. Dar radiația pulsarului optic NP 0532 din nebuloasa Crabului nu este o radiație de echilibru; este posibil să fie vorba de o radiație sincrotronică. Posedând un câmp magnetic destul de puternic, steaua neutronică poate să fie foarte bine sursa unei radiații optice neechilibrate suficient de intense, de aceea descoperirea pulsarului optic nu contravine ipotezei că avem de-a face cu o stea neutronică.

Problemele fundamentale cu care este confruntată astrofizica contemporană

Este foarte firesc ca în fața astronomiei, care are drept obiect de studiu întregul univers, să se ridice un număr imens de probleme diverse. Nici una din aceste probleme, în măsura în care este corect pusă, nu poate fi considerată ca lipsită de importanță sau de interes. Oare nu prezintă interes, de pildă, structura și originea micrometeorilor, a căror greutate reprezintă o fracțiune infimă dintr-un gram? Luna, planetele, cometele, Soarele, stelele, mediul interstelar, galaxiile, radiația cosmică, toate aceste obiecte care umplu cosmosul nu sînt încă nici pe departe studiate pe deplin. Ele merită cea mai mare atenție.

De aici nu rezultă însă că toate problemele au o egală importanță, că nu există cîteva probleme cardinale, fundamentale.

Care anume dintre aceste probleme au o importanță cardinală, este un lucru discutabil, fiecare opțiune reflectînd punctul de vedere subiectiv al unui autor sau al altuia. Cu această rezervă, să încercăm totuși să indicăm problemele cele mai importante cu

care este confruntată astrofizica în zilele noastre. Drept criteriu de selecție menționăm că o problemă fundamentală nu trebuie să fie numai interesantă și importantă, ci să aibă o semnificație profundă pentru astronomie în ansamblul ei, așa încît rezolvarea acestei probleme să însemne soluționarea unei autentice enigme a naturii.

Printre aceste probleme fundamentale se numără următoarele:

1) **Problema cosmologică**, adică structura și evoluția universului în ansamblu.

2) **Natura și mecanismul formării radiogalaxiilor, a quasarelor și a nucleelor galactice.** Probabil că de acestea este strîns legată problema, de asemenea deosebit de importantă, a naturii și mecanismului exploziei supranovelor și a structurii și particularităților stelelor neutronice, ale pulsarilor și în general ale stelelor de tip nou. De altfel, și formarea stelelor și galaxiilor „obișnuite” este tot o problemă de importanță fundamentală.

3) **Problema existenței civilizațiilor extraterestre și a stabilirii de relații cu ele.**

Pentru comparație notăm că în fizica contemporană am considerat că se poate număra printre problemele fundamentale de acest ordin problema particulelor elementare, respectiv a structurii și interconexiunii dintre asemenea particule cum sînt protonul, neutronul, electronul, hiperonii, mezonii, neutrii etc.

Se știe că problema existenței civilizațiilor extraterestre are o vechime de secole. Dar omagiind curajul ideilor lui Giordano Bruno și păstrînd amintirea admirabilei lui fermități și a tragicului lui sfîrșit, nu putem să nu subliniem că pînă nu de mult problema civilizațiilor extraterestre avea un caracter speculativ.

Literalmente abia de cîteva ani cercetarea acestei probleme a început să capete o temelie reală, și anume o dată cu dezvoltarea radioastronomiei. Fără doar și poate, soluționarea unei asemenea probleme poate să aibă o uriașă importanță pentru întreaga omenire. Este suficient să ne gîndim la posibilitatea de a recepta o informație de la o societate aflată la un nivel mai înalt de dezvoltare și care ar putea să-și aibă sediul în apropierea unui astru oarecare. Cu toate acestea, problema civilizațiilor extraterestre este o temă de cercetare oarecum speci-

ală și includerea ei în domeniul astronomiei are un caracter convențional.

Aceeași rezervă este valabilă într-un anumit sens și pentru vasta problemă a studiului Lunii și al planetelor cu ajutorul rachetelor. Bineînțeles, elementul astronomic este cât se poate de substanțial în acest domeniu și răspunsul ce se așteaptă va fi dat în primul rînd la problemele de natură astronomică, cum ar fi aceea a structurii suprafeței Lunii. Totuși, după părerea noastră, centrul de greutate al ambelor probleme menționate nu se situează în sfera intereselor esențiale ale astrofizicii, ci în alte domenii.

Dimpotrivă, primele două probleme menționate mai sus sînt, după cum e ușor de constatat, strîns legate între ele și ne pun în fața celor mai profunde și mai complexe sarcini ale astronomiei. Vom încerca să explicăm această afirmație.

Dezvoltarea științelor naturii se desfășoară de fapt abia de un timp foarte scurt în comparație cu durata existenței lui *Homo sapiens*. Este cât se poate de firesc ca procesul de cunoaștere a lumii înconjurătoare să înceapă cu încercările de a înțelege și de a exemplifica fenomenele cele mai simple și mai apropiate de noi, de care ne lovim direct în practica de toate zilele. Este adevărat că stelele de pe cer au atras atenția oamenilor din vremurile cele mai vechi. Dar înainte de Galilei nu se putea vorbi de un adevărat studiu al stelelor. Este suficient să ne amintim că pînă și Copernic credea că stelele sînt fixate pe o sferă cerească care cuprinde în interiorul ei universul.

Nu trebuie, așadar, să ne mire faptul că dintre ramurile fizicii cea dintîi a început să se dezvolte mecanica, studiul celor mai simple forme de mișcare, și abia după aceea a început progresul în domeniul opticii, al electricității, al fizicii moleculare etc. Este tot atît de clar și de natural faptul că, pe măsura trecerii la noi fenomene, la început s-a încercat folosirea noțiunilor și imaginilor preluate din mecanica clasică și în general din acele domenii ale fizicii care se află în strîns contact cu practica noastră cotidiană.

Abia în secolul al XX-lea în fizică s-a produs o revoluție al cărei conținut este legat în modul cel mai strîns de înțelegerea unui adevăr simplu: legile naturii care ne permit să examinăm și să prevedem cu suficientă precizie mișcarea sau comportarea

planetelor și mașinilor, a proiectoarelor și transformatoarelor etc. devin cu totul insuficiente sau de-a dreptul inexacte cînd e vorba de atomi și nuclee atomice sau de mișcarea particulelor cu viteze apropiate de viteza luminii.

Teoria relativității și teoria cuantică, aceste două mărețe realizări științifice ale secolului al XX-lea, ne-au înarmat tocmai cu cunoașterea legilor mișcării în cazul vitezelor mari și al domeniilor (dimensiunilor) infinit mici. Despre ce anume viteze și dimensiuni e vorba? Viteza luminii este egală cu $300\,000\text{ km/s} = 3 \cdot 10^{10}\text{ cm/s}$, adică este de 10 000 de ori mai mare decît viteza mișcării de revoluție a Pămîntului și de vreo 40 000 de ori mai mare decît viteza de mișcare în raport cu Pămîntul a unui satelit artificial apropiat. Distanța de la Pămînt la Soare este egală cu $1,5 \cdot 10^8\text{ km}$, raza Pămîntului este egală cu aproximativ 6 400 km, înălțimea celor mai mari construcții se măsoară în sute de metri, pe cînd mărimea unui atom nu depășește a suta milioana parte dintr-un centimetru (10^{-8} cm).

Avem de-a face, așadar, cu o deosebire într-adevăr enormă între diverse categorii de dimensiuni. Mai trebuie oare să ne mire faptul că electronii și atomii, ale căror dimensiuni sînt atît de mici încît ei nu numai că nu pot fi văzuți, dar cu greu pot fi chiar imaginați ca o realitate, sînt guvernați de alte legi decît cele de care ascultă mișcarea unei turbine cu aburi? Dacă lumea atomilor și într-o măsură și mai mare lumea nucleelor atomice este astăzi în bună măsură cunoscută, nu se poate spune același lucru despre obiecte și fenomene microcosmice care țin de domeniul fizicii particulelor elementare. Ne referim aici la procese caracterizate prin lungimi de undă de $10^{-14} \dots 10^{-15}\text{ cm}$, respectiv lungimi de milioane și sute de milioane de ori mai mici decît dimensiunile atomilor.

Astăzi nu există încă o teorie a acestor fenomene, deși la elaborarea ei lucrează de aproape trei decenii o armată tot mai mare de fizicieni-experimentatori și teoreticieni. Potrivit unei păreri care se bucură de o largă răspîndire și pe care și noi o împărtășim întru totul, crearea unei teorii a particulelor elementare va fi legată de un ansamblu de idei noi de mare profunzime și, poate, de modificarea concepțiilor de astăzi cu privire la spațiu și timp la scara microcosmică. Este de presupus că pasul care trebuie făcut pentru făurirea unei asemenea

teorii este comparabil cu trecerea de la fizica clasică la teoria relativității și la mecanica cuantică.

Ce legătură au însă cu tema noastră toate aceste considerații binecunoscute? Constatăm aici existența unei analogii directe. Radiotelescoapele și telescoapele optice de astăzi ne-au permis să pătrundem cu privirea în univers pe o distanță de ordinul a $5 \cdot 10^{22}$ km, ceea ce este de $3 \cdot 10^{14}$ ori (de 300 000 miliarde de ori) mai mult decât distanța de la Pământ la Soare!

Desigur, orice analogie are o însemnătate limitată, dar cele spuse mai sus permit, după părerea noastră, să se tragă următoarea concluzie: pentru înțelegerea problemelor cosmologice sînt necesare poate noi idei profunde în afară de cele cunoscute pînă acum în fizică. Mai mult, nu există nici o garanție că legile fizice cunoscute nouă, care se referă atît la domeniul clasic cît și la domeniul fizicii cuantice, pot fi aplicate fără rezerve și fără limite în cosmologie.

Pentru a ilustra această observație, ne vom referi la un exemplu. În așa-numita cosmologie staționară, la care vom mai reveni, se consideră că în univers are loc neîncetat formarea substanței în forme cunoscute nouă, de pildă formarea hidrogenului. Pentru ca acest caracter staționar să se mențină — iar menținerea lui reprezintă deosebirea radicală dintre această schemă cosmologică și cosmologia evoluționistă — este suficient să apară un singur atom nou pe an într-un cub cu muchea de circa 1 km. Dacă ne vom aminti că într-un asemenea cub, la presiunile atmosferice normale, s-ar afla $2,7 \cdot 10^{34}$ molecule de aer, va apărea ca foarte probabilă și firească imposibilitatea de a respinge modelul cosmologic staționar pornind de la măsurătorile de laborator și de la fizica bazată pe ele. Faptul că un asemenea model, aflat în contradicție cu concepțiile fizice acceptate astăzi, displace total multora, inclusiv și autorului acestui studiu, încă nu poate servi ca argument hotărîtor în cazul de față. Un asemenea argument îl pot oferi numai rezultatele observațiilor astronomice.

Așadar, unul dintre capitolele astronomiei și astrofizicii, cosmologia, face parte, fără îndoială, dintre acele — foarte puține la număr — discipline științifice (o altă disciplină de acest fel este fizica particulelor elementare) care ne confruntă cu probleme principiale de o importanță cardinală. Prin această zonă trece hotarul dintre lumina cunoașterii și întunericul absolut al necunoscutului.

Considerentele expuse nu trebuie în nici un caz să fie interpretate ca o minimalizare a valorii metodelor fizice în astronomie. Dimpotrivă, necesitatea folosirii întregului arsenal al fizicii moderne în astronomie (ceea ce și constituie obiectul astrofizicii) este incontestabilă și numai niște obscuranțiști în știință ar putea s-o pună la îndoială. Din fericire, în astronomie, spre deosebire de biologia noastră cea mult încercată, asemenea obscuranțiști, pe cît sîntem informați, nu există.

Cu alte cuvinte, aplicabilitatea cea mai largă a legilor fizicii la studiul planetelor, al stelelor și al galaxiilor nu stîrnește nici un fel de îndoieli, și am ținut doar să subliniem existența unor anumite condiții și a unor probleme astronomice la a căror cercetare nu trebuie să uităm că legile astăzi cunoscute ale fizicii au un caracter probabil limitat.

Problema cosmologică nu poate fi în nici un caz considerată o problemă nouă, deoarece ea a început să fie serios discutată încă în secolul trecut.

În primele faze însă, abordarea ei s-a limitat la constatarea cîtorva paradoxuri care au atras atenția oamenilor de știință au enunțat problemele, dar nu le-au dat nici un răspuns. Etapa actuală a dezvoltării cosmologiei a fost inaugurată în 1917 prin activitatea marelui creator al teoriei relativității, Einstein, urmată de lucrările lui A.A. Fridman, efectuate în Uniunea Sovietică la începutul deceniului al doilea pe baza teoriei relativității generalizate. Este interesant că, după cum a reieșit abia după 10-15 ani, concluzia esențială a lui Fridman ar fi putut fi obținută și în cadrul teoriei gravitaționale a lui Newton. Aceasta ar fi cerut însă valorificarea cîtorva idei în plus, care, într-un anumit sens, erau implicate în teoria relativității generalizate.

Concluzia lui Fridman la care ne referim constă, nici mai mult, nici mai puțin, în afirmația că universul nu este staționar și se poate extinde. Or, toate ipotezele cosmologice anterioare porneau de la concepția apriorică a inexistenței expansiunii universului, a caracterului lui staționar, adică a imuabilității caracteristicilor medii ale universului, cum ar fi densitatea medie a substanței etc. de-a lungul vremurilor. Inadmisibilitatea unor asemenea aserțiuni apriorice în știință este binecunoscută și dezvoltarea cosmologiei o confirmă în mod strălucit. Trebuie spus că în deceniul al treilea observațiile astronomice i-au condus într-adevăr pe oamenii de

știință la concluzia că universul se extinde; ulterior această concluzie a fost susținută prin argumente tot mai convingătoare. Cu cât mai mult este distanțată de noi o galaxie oarecare, cu atât ea se depărtează cu o viteză mai mare, ceea ce se verifică printr-un binecunoscut fenomen fizic, efectul Doppler, care constă în deplasarea spre roșu a liniilor spectrale în spectrul surselor de lumină care se depărtează de noi.

Este adevărat că s-au făcut încercări de a explica deplasarea spre roșu observată la spectrele galaxiilor nu prin îndepărtarea lor unele de altele, ci prin alte cauze. Dar toate aceste încercări, care nu au avut niciodată o bază solidă, au fost infirmate una după alta, iar faptul expansiunii, dimpotrivă, este confirmat de noi și noi măsurători.

Îndepărtarea galaxiilor unele de altele, expansiunea universului, este un fenomen atât de neașteptat și de grandios, încât semnificația lui depășește cadrul fizicii și al astrofizicii.

Unii au încercat să exploateze faptul expansiunii universului pentru a găsi niște confirmări indirecte ale legendei biblice a creației lumii. În orice caz, problema expansiunii universului și a deplasării spre roșu a fost menționată într-una din enciclicele papei Pius al XII-lea.

Este evident că nici un fenomen referitor la structura universului (și în general nici un fapt) nu este de natură să confirme credința în Dumnezeu, a cărei deviză ar putea fi cunoscuta maximă atribuită unuia dintre părinții bisericii: „Cred pentru că este absurd“.

Însuși caracterul irațional al religiei este suficient ca să nu ne mire întreaga inconsistență a încercărilor de a stabili o legătură între legendele biblice și îndepărtarea galaxiilor unele de altele, despre care autorii bibliei nu au avut, bineînțeles, nici cea mai mică idee.

Este în schimb de mirare cum au putut afirma unii filozofi că expansiunea universului, caracterul ei nestaționar contravine materialismului.

O poziție autentic materialistă constă în recunoașterea existenței universului cu totul independent de conștiința umană și înainte de apariția acestei conștiințe,

și nu în încercările profund antiștiințifice de a impune naturii anumite legi, în speță de a postula legi ale mișcării galaxiilor și ale întregii părți cercetate a universului.

La prima vedere se poate părea că expansiunea universului implică în mod necesar ipoteza caracterului lui nestaționar și, concret, reducerea în timp a densității medii a substanței în univers. Într-adevăr, în modelele cosmologice evoluționiste, a căror studiere a fost inaugurată de lucrările lui Fridman, densitatea medie a substanței variază cu timpul.

Există totuși un model cosmologic staționar în care, în pofida expansiunii, densitatea substanței rămâne neschimbată datorită generării substanței noi, în formele ei cunoscute. O asemenea generare este, fără îndoială, în contradicție cu legile fizice astăzi admise, dar, după cum am mai arătat, în cazul de față acest argument este insuficient, deoarece s-ar putea spera că în viitor apariția substanței noi își va găsi explicația, odată cu o mai mare precizare a legilor cunoscute.

Repetăm însă că există o singură cale certă de verificare a exactității unor afirmații cosmologice (și în general științifice): confruntarea teoriei cu experiența sau cu observația. În cazul de față o asemenea confruntare nu prezintă în principiu dificultăți.

Astfel, în cadrul cosmologiei evoluționiste, numărul galaxiilor și în special al radiogalaxiilor într-un volum dat oarecare — într-o regiune a spațiului — trebuie să se modifice cu timpul sau, ceea ce este echivalent, cu distanțarea de Pământ¹. În cosmologia staționară, dimpotrivă, numărul mediu de galaxii într-o unitate de volum nu trebuie să depindă de distanța de Pământ. Odată cu progresele radioastronomiei a apărut posibilitatea de a face o verificare determinând numărul radiogalaxiilor la diverse distanțe de Pământ. Cu toate acestea (cititorii ne vor crede, desigur, fără alte explicații), rezolvarea practică a acestei probleme este deosebit de dificilă. Unele rezultate au și fost totuși obținute și trebuie spus că ele (la fel ca unele date optice) depun mărturie împotriva cosmologiei staționare și în favoarea cosmologiei evoluționiste. Afară de aceasta, descoperirea radioemisiunii cosmice remanente cu o temperatură de $2,7^{\circ}\text{K}$ este și ea un argument cât se poate de convingător împotriva cosmologiei staționare.

¹ Când observăm o galaxie care se află la o distanță, bunăoară, de 1 miliard de ani-lumină de noi, trebuie să ținem seama că lumina percepută de noi a fost emisă de ea cu un miliard de ani în urmă.

Dar cu aceasta problema cosmologică nu este în nici un caz în întregime rezolvată.

Cum a evoluat universul în trecut, cum se va dezvolta el în viitor, cum s-au format, se formează și se dezvoltă galaxiile? Toate aceste probleme așteaptă o cercetare aprofundată. Tocmai în cercetarea ultimului punct — a formării, structurii și evoluției galaxiilor — cosmologia face joncțiunea cu a doua dintre problemele fundamentale menționate mai sus ale astrofizicii contemporane.

Radiogalaxiile, quasarii și supranovele stîrnesc astăzi un interes atît de mare din partea oamenilor de știință tocmai pentru că în cazul lor avem de-a face cu o explozie, cu o schimbare bruscă, cu nașterea de noi forme.

Neavînd posibilitatea să dezvoltăm aici pe larg această temă, să enunțăm doar principala dilemă pe care, după părerea noastră, o prezintă ea. Punctul de vedere cel mai răspîdit și pe care, printre mulți alții, îl împărtășește și autorul, este că radiogalaxiile, quasarii și supranovele se formează printr-o comprimare a gazelor urmată de o explozie determinată de degajarea unei mari energii gravitaționale în procesul de comprimare. Întrucît comprimarea gazului poate avea un caracter catastrofic, astăzi pentru descrierea ei se folosește adesea termenul de colaps, de care vom face uz și noi.

Așadar, prima alternativă constă într-o formă oarecare a colapsului gravitațional, însoțit de o explozie. Un alt punct de vedere cu privire la formarea tuturor stelelor și a galaxiilor — punct de vedere enunțat cu destul de multă vreme în urmă și dezvoltat astăzi de V. A. Ambartsumian — se reduce la ipoteza existenței în univers a unui fel de corpuri supradense (protocorpuri), care la răstimpuri explodează, proiectînd gaze și poate și stele întregi. Prin urmare în acest caz nu are loc un colaps, ci mai curînd se poate vorbi de un anticolaps.

Ipoteza existenței unor protocorpuri supradense care se mențin poate timp de miliarde de ani nu este cîtuși de puțin confirmată de informații directe. Dimpotrivă, această ipoteză întîmpină o serie de obiecții, mai ales cînd este vorba de formarea stelelor și galaxiilor obișnuite. Dar atunci cînd examinăm obiecte noi, situația din astrofizică este cu mult mai bine caracterizată printr-o altă aserțiune: ipoteza existenței protocorpurilor nu poate fi categoric respinsă pe baza datelor

de care dispunem. Aceasta înseamnă că astrofizica mai are de străbătut, după cum se pare, un drum lung și, fără îndoială, foarte dificil ca să ajungă să clarifice definitiv natura proceselor care duc la formarea quasarelor și radiogalaxiilor, precum și a altor fenomene observate în zonele centrale — cele mai dense — ale galaxiilor, așa-numitele nuclee galactice.

Este posibil ca problema supranovelor și a stelelor neutronice să fie strîns legată de problema naturii quasarelor și a nucleelor galactice¹. În ambele cazuri se observă fenomene explozive și o puternică radiație neechilibrată. Aceasta se manifestă deosebit de pregnant în cazul pulsarului NP 0532, rămasăta supranovei din 1054, a cărei izbucnire a dus la formarea nebuloasei Crabului. De pe urma exploziei nu a rămas o stea obișnuită, ci o stea rapid variabilă, care după toate probabilitățile este o stea neutronică magnetizată, avînd o mișcare de rotație. Este foarte probabil că această stea este nu numai o sursă de unde radio, de lumină și radiație Roentgen, ci și sursa radiației cosmice care umple nebuloasa Crabul. O asemenea stea neutronică cu un puternic cîmp magnetic este, în multe privințe, asemănătoare quasarelor, care posedă și ei un cîmp magnetic și emit lumină și unde radio. De altfel natura pulsarului din nebuloasa Crabului încă nu este definitiv stabilită. Credem că nu este cu totul exclusă posibilitatea să nu fie vorba de o stea neutronică, cum se consideră de obicei, ci mai curînd de un mic quasar, așa zice „un pui de quasar“. Oricum ar fi,

¹ Ultima parte a prezentului paragraf, așa cum se înfățișează mai sus, a fost scrisă la începutul anului 1969. Nu este însă lipsit de interes să reproducem sfîrșitul acestui paragraf în forma inițială a textului publicat în 1965 sub formă de broșură în editura „Znanie“. Iată acest text: „Avem posibilitatea să consemnăm aici un singur fapt care pare foarte probabil după descoperirea radiației Roentgen emise de nebuloasa Crabului. Se pare că atunci cînd explodează o supranovă, ea lasă o rămășiță, în afară de anvelopa gazoasă, pe care-o proiectează și care se extinde. Acest ceva este probabil o sursă puternică a radiației cosmice sau în orice caz a componentei ei electronice.

Ce rămîne deci de la steaua explodată, în afară de înveliș? N-ar putea fi vorba de o stea supradensă, în speță neutronică, înconjurată de un cîmp magnetic și care se rotește în jurul axei sale? Da, este plauzibilă și o asemenea ipoteză, dar în mod cert nu se știe nimic în această privință“. Astăzi însă se știe în mod cert că de pe urma exploziei stelei din anul 1054 a rămas într-adevăr „ceva“, și anume este cel mai probabil că ceea ce a rămas e o stea neutronică înconjurată de un cîmp magnetic și că ea se rotește în jurul axei sale.

o anumită afinitate între exploziile din quasari, nucleeele galactice și izbucnirile supranovelor ni se pare foarte probabilă, fără să ne fie totuși clar pînă unde merge această analogie.

Progresele astrofizicii și organizarea științei

Principalele concluzii care se desprind cu claritate din cele de mai sus sînt următoarele.

Astrofizica și astronomia în ansamblu s-au îmbogățit în ultimul timp cu o serie întreagă de metode de investigație noi și eficiente. Aceasta a dus la o lărgire considerabilă a frontului activității, la o modificare calitativă a situației.

Schimbările intervenite în astronomie, pe care le considerăm revoluționare și pe care am încercat să le caracterizăm mai sus, au dus totodată la anumite consecințe importante și în sfera legată de organizarea și planificarea științei, pregătirea de specialiști etc.

1) Astronomia, fără să mai vorbim de astrofizică, a fost totdeauna legată de fizică. Cu toate acestea, în perioada dezvoltării ei rapide, dar, am putea spune „pașnice“, adică în perioada monopolului metodelor optice, se putea preciza de obicei cu certitudine cine este fizician și cine este astronom. Vorbind concret, încă cu două-trei decenii în urmă, cu astronomia se ocupau aproape numai oamenii de știință cu pregătire astromonică de specialitate și care de la începutul activității lor s-au consacrat acestei științe.

Cum e și firesc, odată cu afirmarea noilor metode, cu totul diferite de cele vechi, situația aceasta s-a schimbat. De pildă, astronomii-opticieni erau străini de metodologia radioastromonică, așa încît în acest domeniu al astronomiei a fost necesar să vină fizicieni, radiofizicieni și ingineri radio. Analog, majoritatea celorlalte metode noi din astronomie sînt dezvoltate în primul rînd de către oameni de știință cu o pregătire și cu o experiență prealabilă de fizicieni și ingineri. De menționat că și autorul acestei lucrări nu numai că este fizician ca pregătire, ci a lucrat și continuă să lucreze în domeniul fizicii, paralel cu acela al astronomiei.

Dacă lăsăm la o parte aspectele secundare și eventualele complicații izvorîte din complexitatea relațiilor umane, modificarea componenței și a profilului oamenilor de știință care se ocupă astăzi cu astronomia (și care, prin urmare, trebuie să fie numiți astronomi) nu este stăvilită de nici un fel de contradicții și-și dovedește pe deplin fecunditatea.

În această ordine de idei am ține totuși să subliniem trei aspecte.

În primul rînd, practica atestă cît se poate de convingător că „oamenii noi“ din astronomie lucrează cu succes numai atunci cînd acționează în strîns contact cu astronomii cu pregătire de specialitate și nu încearcă „să descopere America“ luînd-o de la început și desconsiderînd întreaga bogăție de experiență și de cunoștințe a astronomilor. De aici decurge clar sarcina de a duce înainte cercetările prin metode noi, într-un front unitar, pe făgașul unic al astronomiei moderne.

A doua problemă importantă se referă la pregătirea tinerilor astronomi. Se impune îmbunătățirea programelor de studiu ale secțiilor de astronomie ale universităților (în sensul întăririi legăturilor cu fizica modernă) și totodată pregătirea de astronomi sau cel puțin organizarea unei serii de cursuri de astronomie la facultățile de radiofizică și fizică.

În al treilea rînd, în ultimele două-trei decenii, atît în fizică și biologie cît și în astronomie s-a modificat substanțial ritmul schimbului de informație științifică, și — de ce să n-o spunem? — a apărut și o anumită dezordine. Datorită atitudinii remarcabile de care au dat dovadă radioastronomii din Cambridge, lumea a aflat despre descoperirea pulsarilor dintr-un articol destul de detaliat, apărut în revista „Nature“ din 26 februarie 1968 (vezi amănunte în ultimul studiu din acest volum). Dar întreaga istorie ulterioară a cercetării pulsarilor seamănă cu o cursă de automobile. Primul pulsar descoperit la Cambridge — CP 1919 — a fost observat și de astronomii de la un alt observator britanic, radioobservatorul Jodrell Bank, la 25 februarie, iar primele rezultate ale observațiilor efectuate aici au fost publicate în revista „Nature“ din 9 martie. De atunci lucrările despre pulsari s-au ținut lanț. Publicul află noutățile referitoare la pulsari în primul rînd nu din articole, ci din știri transmise telegrafic sau „prin avion“ (există un buletin săptămînal de informații al Uniunii Internaționale de Astronomie), cît și din ziare și prin radio.

În esență acest caracter al vieții științifice și acest ritm al schimbului de informații reflectă particularitățile epocii noastre și reprezintă o consecință inevitabilă a ei. Intervin însă și alți factori care influențează situația, cum ar fi lupta pentru prioritate, iar uneori pur și simplu goana după reclamă și glorie.

Nu este locul aici să ne ocupăm de aspectele sociale și psihologice ale problemei priorității în știință și ale altor probleme legate de aceasta. Am vrea doar să avertizăm pe cititor să fie prudent. Chiar dacă va citi într-o carte de popularizare sau chiar într-o monografie științifică ori într-un studiu publicat într-o revistă de specialitate că o anumită realizare din domeniul astronomiei moderne se datorește personalității X sau personalităților X și Y, cititorul să-și amintească de vorba din bătrâni că adesea e mai bine să nu-ți crezi ochilor, nici chiar propriilor tăi ochi. În majoritatea cazurilor marile descoperiri sau realizări ale astronomiei moderne rezultă dintr-o activitate cu adevărat colectivă. Foarte multe concluzii au fost prevăzute de foarte mulți oameni de știință, o serie de rezultate au fost realizate și consolidate treptat și pe căi diferite. În ceea ce privește teoriile și rezultatele fizice preluate de astrofizică și folosite de această disciplină, aproape în toate cazurile ele au fost bine cunoscute mai de mult de către fizicieni, așa că în fond e vorba de valorificarea unor concluzii mai vechi. În aceste condiții indicarea unei singure personalități sau a câtorva ca „mari descoperitori” este, de obicei, fie un rezultat al unui grad redus de informare, fie o denaturare a adevărului, fie ceva ce englezii numesc *adopted by repetition* (admis în urma unor multiple repetări).

Aceste observații nu au drept scop diminuarea rolului autorilor unor realizări științifice. Este, de pildă, incontestabil faptul că cosmologia contemporană a luat ființă odată cu lucrarea publicată de Einstein în 1917; este tot atât de limpede importanța remarcabilă a lucrărilor lui Fridman, Hubble și ale multor alți oameni de știință. Când se face istoricul unei descoperiri ar trebui menționați toți cei care și-au adus contribuția la cercetarea problemei. Ceea ce considerăm însă în mod cu totul deosebit ca fenomen negativ este exacerbară pretențiilor la prioritate, care duce fie la o accentuare nejustificată a meritelor unui autor sau ale câtorva, fie la o înșirare nesfârșită

de nume, care uneori îngreuiază lectura, fie la încercările unor autori de a-și afirma propria lor prioritate, încercări care iau forme diverse și, de obicei, nu prea elegante. În această luptă unele pretenții de prioritate sînt neîntemeiate, iar altele amintesc de cearta dintre două personaje din *Revizorul* lui Gogol, Dobeinski și Bobeinski, pe problema care dintre ei a spus cel dintîi cuvîntul „ei!”. Din toate aceste motive autorul nu menționează în articolele sale nume și nu se oprește în mod special asupra istoriei diverselor descoperiri sau realizări. Singura excepție se face în capitolul *Astrofizica radiației cosmice*, cînd se vorbește despre mecanismul sincrotron al radiației cosmice.

2) Folosirea noilor metode în astronomie reclamă de obicei mari cheltuieli. Este adevărat că și marile telescoape optice sînt foarte scumpe, dar ele au fost create în răstimp de decenii și sînt exploatate în decursul unei perioade și mai îndelungate. În ceea ce privește radiotelescoapele, ele se construiesc de regulă mai repede, dar se și învechesc destul de repede.

Dacă la sfîrșitul celui de-al doilea război mondial radioastronomia era înzestrată doar cu aparatură transformată din vechile aparate radar, astăzi există și se construiesc numeroase radiotelescoape gigantice, cu un diametru real de sute de metri și al căror cost se ridică la zeci de milioane de ruble. Cercetările astronomice efectuate cu ajutorul sateliților și al rachetelor de asemenea nu pot fi ieftine, fie chiar numai pentru că aparatul respectiv costă scump. Astronomia neutrinilor se poate dezvolta numai la mare adîncime în subsol și deci cere și ea mari cheltuieli etc.

Bineînțeles, nu trebuie să ne închipuim că astrofizica nu poate deloc să înainteze fără mari cheltuieli. În primul rînd există multe probleme a căror rezolvare cere cheltuieli relativ modeste. În al doilea rînd, în știința contemporană este organizată în linii mari colaborarea internațională. Rezultatele științifice obținute într-o țară oarecare cu ajutorul unor instrumente unice intră în cele din urmă în patrimoniul comun al oamenilor de știință. În al treilea rînd, un rol foarte mare revine astrofizicii teoretice, ai cărei promotori nu au nevoie de utilaj (dacă trecem cu vederea folosirea mașinilor de calcul). Și totuși, vorbind în ansamblu și concret, în cazul unei țări ca Uniunea Sovietică, unde amploarea activității științifice este imensă, dezvoltarea armonioasă a astronomiei este cu desăvîrșire imposibilă fără construirea de aparate mari și costisitoare.

3) Când vorbim despre căi noi și despre verificarea unor noi idei și metode, realizarea unor progrese, chiar cu oameni adevărați și cu fonduri considerabile, este posibilă numai în cazul unei organizări concrete și al unei planificări raționale a activității. Dacă, bunăoară, în loc de a se rezolva cu rapiditate și curaj toate problemele organizatorice și financiare, proiectarea și construirea unor mari radiotelescoape s-ar târăgăna timp de mai mulți ani, ar fi cu neputință să se asigure victoria în competiția internațională contemporană.

Afară de aceasta, să ținem minte că într-o serie de cazuri o primă rezolvare a unei probleme oarecare este posibilă cu mijloace relativ modeste, dar că pentru a face pașii următori este nevoie de obicei de cheltuieli materiale de multe ori mai mari. De aceea rapiditatea în rezolvarea problemelor organizatorice a activității științifice este adeseori echivalentă cu economisirea unor fonduri uriașe.

Nu este cazul să ne oprim aici asupra problemelor organizatorice ale activității de cercetare științifică și de finanțare a ei. Dar autorul se consideră dator să-și exprime profunda convingere că în domeniul astronomiei, în sfera problemelor și preocupărilor la care ne-am referit mai sus, organizarea rațională a activității științifice, a planificării și finanțării ei nu sînt nici pe departe întotdeauna asigurate în condiții optime.

4) Dezvoltarea științei poate fi considerabil frînată dacă ea ajunge prizonieră a scolasticii și a metafizicii.

O ilustrare pregnantă a afirmațiilor noastre este preistoria revoluției din astronomie, pe drept cuvînt legată de numele lui Galilei, revoluție la care ne-am referit și la începutul studiului nostru.

Telescoapele lui Galilei se prezentau ca niște simple tuburi prevăzute cu două lentile. Dar ochelarii — instrument de la care s-au luat lentilele — erau folosiți pe atunci de sute de ani și chiar telescopul a fost inventat înaintea lui Galilei. De aceea ar putea să stîrnească mirare faptul că pînă la acest om de știință nimeni nu a cercetat cerul cu ajutorul instrumentelor optice.

Explicația este destul de surprinzătoare: cercetarea universului cu ajutorul telescopului era împiedicată în primul rînd de prejudecăți sau, dacă vreți, de o atitudine filozofică vicioasă. Într-adevăr, în discuția despre lentile s-a susținut următorul punct de vedere: „Scopul principal al observației este

cunoașterea adevărului. Or, prin lentilele ochelarilor vedem obiectele mai mari sau mai mici decît sînt în realitate. Lentilele ne arată obiectele mai apropiate sau mai îndepărtate, iar uneori chiar răsturnate și deformate. Așadar, lentilele nu ne permit să vedem realitatea. De aceea cine nu vrea să fie indus în eroare nu trebuie să folosească lentilele“.

Ce-i drept, Galilei nu a folosit pur și simplu telescopul, ci l-a perfecționat substanțial, în special prin alegerea unor lentile adecvate care realizează o mărire relativ mare, de circa 30 de ori. De menționat că Galilei a construit aproape 100 de telescoape, dintre care a folosit numai șapte.

Lucrul cel mai important este însă că Galilei a avut încredere în lentile, în autenticitatea cunoștințelor care pot fi obținute cu ajutorul telescoapelor. Se poate aprecia cît de revoluționar a fost acest pas, de pildă după faptul că majoritatea contemporanilor lui Galilei au desconsiderat pur și simplu descoperirile lui, socotindu-le rodul fanteziei, ba chiar au refuzat să folosească pînă și cele mai perfecte telescoape construite de el. Într-o scrisoare adresată lui Kepler, Galilei scria: „Să rîdem, prietene Kepler, de marea prostie a oamenilor. Ce putem spune despre cei mai de seamă filozofi de aici, care cu o îndărătnicie răutăcioasă, în pofida miilor de insistențe, nu au vrut să arunce măcar o privire nici asupra planetelor, nici asupra Lunii, nici asupra telescopului“.

Numai cu prețul unor uriașe eforturi au izbutit Galilei și discipolii lui să frîngă împotrivirea înverșunată a scolasticilor și să deschidă zăgazurile pentru progresul științific.

Din păcate ar fi o greșeală să ne închipuim că astăzi, la 350 de ani de la Galilei, scolastica și metafizica au fost definitiv înfrînte. Este suficient să ne referim la contestarea apriorică a legilor lui Mendel și a întregii teorii cromozomice a eredității — contestare care a avut loc nu chiar așa demult — pentru a ne convinge de viabilitatea pseudoștiinței susținute cu pretense argumente filozofice.

Aceeași concluzie se desprindea din încercările destul de numeroase de a califica drept idealiste teoria relativității, mecanica cuantică și cosmologia relativistă. Pe aceeași linie se situează în fond neînțelegerea destul de răspîdită a rolului și locului cercetărilor științifice fundamentale care nu sînt nemijlocit legate cu tehnica și cu economia națională.

Și totuși greșelile trecutului ne-au învățat multe, și dificultățile care se ridică astăzi în calea astronomiei pot fi considerate un fenomen secundar, care nu mai modifică tabloul în ansamblu.

Posibilitățile astronomiei au crescut. În fața ei se ridică probleme grandioase și de natură perfect realistă, a căror rezolvare va cere, probabil, decenii de muncă încordată. Nu mai vorbim despre faptul că locul problemelor care au apărut sau au fost clarificate astăzi îl vor lua noi probleme.

Nu începe îndoială că încă înainte de sfârșitul secolului al XX-lea și poate chiar în anii următori sînt de așteptat multe descoperiri astronomice noi, deosebit de interesante.

2

Structura universului și evoluția lui în timp

În vîltoarea evenimentelor istorice din 1917 au fost prinse milioane și milioane de oameni. În această ultimă perioadă a războiului mondial, în epoca Revoluției din Octombrie din Rusia, poate că numai cîteva zeci de fizicieni și astronomi din întreaga lume au remarcat nașterea cosmologiei contemporane. Ea și-a făcut apariția sub forma unei mici lucrări, intitulată Problemele cosmologiei și teoria relativității generalizate, publicată în „Comunicările Academiei de științe din Prusia”.

Autorul acestei lucrări era Albert Einstein, unul dintre cele mai mari genii ale tuturor timpurilor.

Locul cosmologiei în cadrul astronomiei

Cosmologia își propune să dea răspuns la întrebarea: care este structura universului „în ansamblu” și cum evoluează el în timp. Alături de fizica particulelor elementare, ea face parte din direcțiile fundamentale ale științei contemporane.

Cosmologia este o parte a astronomiei; ea se ocupă cu studiul universului în mare. Distanțele cu care are de-a face cosmologia se cifrează la miliarde și zeci de miliarde de ani-lumină, iar perioadele de timp cu care operează sînt de ordinul a miliarde și zeci de miliarde de ani. Aceste cifre par amețitoare din pricină că le comparăm cu mărimile cu care sîntem obișnuiți să avem de-a face în viața de toate zilele: metri și kilometri, ore și ani. Pentru ca această deosebire în ceea ce privește unitățile de măsură să nu deranjeze comparațiile noastre, în cele ce urmează vom folosi în general centimetrii și secunde, deși în felul acesta imaginile vor pierde întrucîtva caracterul lor concret.

Distanțele și perioadele de timp caracteristice cosmologiei sînt: 10^{28} cm și $3 \cdot 10^{17}$ s (distanța de un an-lumină este egală aproximativ cu 10^{18} cm, iar un an are $3 \cdot 10^7$ s). Este, desigur, greu să ne imaginăm asemenea mărimi cosmice, după cum este tot atît de greu să ne transpunem mintal în microcosmos — lumea atomilor (în care dimensiunile caracteristice

sînt de ordinul a 10^{-8}cm) și a particulelor elementare (în prezent se studiază procese pentru care sînt caracteristice distanțe ce merg pînă la 10^{-15}cm).

Cosmologia și fizica particulelor elementare sînt oarecum doi antipozii. Dar, cum se spune, extremele se ating. Într-adevăr, cosmologia și fizica particulelor elementare au o trăsătură comună, care determină însemnătatea lor în știință: mai ales în cadrul acestor domenii, respectiv în astronomie și în fizica particulelor elementare, se trece hotarul dintre cunoaștere, fie chiar incompletă, și bezna necunoscutului.

Să explicăm despre ce este vorba, alegînd pentru exemplificare fizica corpului solid — un capitol vast și deosebit de important sub raport practic al fizicii contemporane. Există în acest domeniu o mulțime de probleme nerezolvate și neclarificate. Sîntem însă siguri că astăzi există baza necesară soluționării lor. Această bază este mecanica cuantică. Sarcina pe care și-o pun fizicienii este ca, sprijinindu-se pe principiile generale cunoscute sau — ca să vorbim mai formal — folosind limbajul matematic și pornind de la ecuații cunoscute, să obțină din aceste ecuații diverse rezultate greu de pus în evidență din diferite motive (de pildă, din cauza marelui număr de particule de a căror comportare trebuie să se țină seama; este suficient să menționăm că, bunăoară, într-un centimetru cub de fier se află aproximativ 10^{23} atomi).

Cu totul altfel stau lucrurile în cazul interacțiunii a doi protoni, care posedă o energie de cîteva sute de miliarde de electronvolți sau chiar și mai mare. Rezultatul unei asemenea ciocniri nu poate fi prevăzut, dar aceasta nu din cauze tehnice, ci pentru că ne lipsesc înseși bazele cunoașterii, neexistînd încă teoria fundamentală care să permită interpretarea fenomenelor de acest fel. Analog, atunci cînd studiem stelele, planetele și mediul interstelar, folosim — absolut justificat — obișnuita fizică „terestră”. Dar, odată cu trecerea în domeniul cosmologiei, în primul rînd nu mai avem certitudinea că putem folosi fără nici o limitare, pretutindeni și oricînd, legile cunoscute ale fizicii. În al doilea rînd — și aceasta este, poate, și mai important —, în cosmologie apar probleme a căror rezolvare reclamă idei și principii noi, necunoscute, cu totul neclare încă.

Se spune adesea că astfel de direcții ale științei ca fizica particulelor elementare și cosmologia sînt deosebit de importante

și interesante. O asemenea apreciere ni se pare cu totul nereușită. Orice problemă de știință just formulată este interesantă; cît despre „importanța” unei probleme sau a unei discipline științifice, după ce criterii ar putea fi ea evaluată? (În această constă, de altfel, una din deosebirile dintre știință și tehnică, unde drept criteriu al importanței poate fi folosită eficiența economică). Și totuși este nu numai posibil, dar și necesar să scoatem în evidență, printre numeroasele probleme ale științei, pe cele fundamentale sau principiale. În cazul problemelor fundamentale, poate tocmai lipsa unor baze ferme pentru rezolvarea lor ar putea fi considerată drept criteriu de identificare. Dacă vom admite acest criteriu, va trebui să considerăm că în științele care au drept obiect natura nevie există astăzi numai două probleme fundamentale: fizica particulelor elementare și cosmologia.

Primele modele cosmologice

Pînă în 1917 oamenii de știință nu au izbutit să construiască un model cosmologic lipsit de contradicții interne. S-au creat însă premise pentru realizarea unei cînturi revoluționare în cosmologie.

Dacă ne vom adînci în trecutul istoric, vom constata că, de fapt, trebuie să încadrăm în cosmologie o parte considerabilă a astronomiei din perioada anterioară descoperirii telescopului. „Sistemele lumii” elaborate de Ptolemeu și de Copernic sînt niște imagini ale structurii universului, niște sisteme cosmologice. Dar pentru scopurile pe care ni le-am propus nu este necesar să ne oprim la aceste etape timpurii. Este de ajuns să spunem că Nicolaus Copernic (1473—1543), ca și predecesorii lui, aveau în vedere numai sistemul solar și situa stelele pe o „sferă a stelelor fixe”. Chiar și Kepler, în cartea sa *Epitome astronomiae copernicanae* (Sinteza astronomiei lui Copernic), apărută în perioada 1618—1622 (a fost tipărită în cîteva tranșe), situa Soarele — ce-i drept, cu unele rezerve — în sistemul unei sfere solide pe care erau fixate stelele („sfera stelelor este alcătuită din gheață sau din cristal”). Kepler considera că depărtarea pînă

la această sferă care ar mărgini universul este de 60 de milioane de raze pămîntesti (aproximativ $4 \cdot 10^{16}$ cm).

Astăzi ştim că această distanţă este de o sută de ori mai mică decît depărtarea pînă la steaua cea mai apropiată de noi. Este adevărat că încă Giordano Bruno, ars pe rug de Inchiziţie în anul 1600, propaga ideea că universul este infinit, după cum infinit este şi numărul lumilor (al stelelor). El a depăşit cu mult gîndirea epocii sale; după cum am văzut, chiar marele astronom Kepler, care cunoştea ideile lui Bruno, de fapt le respingea. Dar deja în secolul al XVIII-lea, după ce Newton (1643—1727) a stabilit legile mecanicii şi legea gravitaţiei universale, ideea unei sfere cereşti a început să pară cu totul fantastică şi a fost înlăturată.

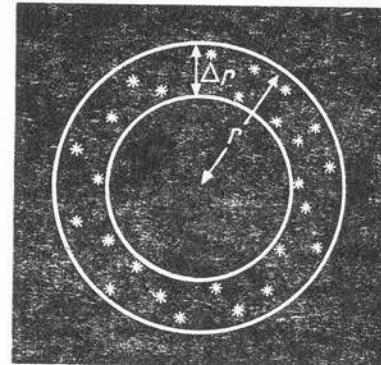
A devenit dominant modelul unui univers nemărginit în spaţiu. Dezvoltarea astronomiei telescopice, inaugurată de Galilei în 1609, a confirmat — sau în orice caz nu a contrazis — această imagine. Galilei a fost acela care a arătat că, de fapt, Calea Lactee este formată din stele. Apoi, pe la începutul secolului al XIX-lea, în primul rînd datorită lui W. Herschel (1738—1822), studiul stelelor şi al nebuloaselor a progresat simţitor, iar cunoştinţele despre sistemul nostru stelar — Galaxia — şi despre alte sisteme stelare (galaxii) au devenit mai consistente. După aprecierile actuale, diametrul Galaxiei este de 10^{23} cm, ea cuprinzînd sute de miliarde de stele.

Astronomia extragalactică — dacă e să vorbim despre studiul efectiv al altor galaxii — s-a dezvoltat abia în secolul nostru. Faptul acesta nu a împiedicat însă pe savanţii din trecut să folosească ipoteza că există o pluralitate infinită de galaxii care populează universul în mod mai mult sau mai puţin uniform, cu o densitate medie invariabilă în timp, ipoteză care se bucura, pare-se, de o mare popularitate.

Ca să folosim limbajul contemporan, în secolul al XIX-lea s-a utilizat pentru reprezentarea universului un model cosmologic infinit, omogen în spaţiu şi invariabil în timp (staţionar). Acest model presupunea, bineînţeles, spaţiul euclidian. Să ne amintim că însăşi posibilitatea existenţei unui spaţiu cu o geometrie neeuclidiană a fost demonstrată abia în secolul trecut, de Lobacevski, Bolyai, Gauss şi Riemann.

Dacă facem abstracţie de dezvoltarea rapidă şi impresionantă a altor domenii ale astronomiei şi ne gîndim numai la cosmologie, constatăm că secolul al XIX-lea şi, în continuare,

Fig. 1. Cantitatea de lumină care ne vine de la stelele aflate într-un strat sferic nu depinde de raza r , dar este proporţională cu grosimea stratului Δr .



perioada pînă la 1917 au adus o singură contribuţie: au fost clarificate unele dificultăţi profunde ale modelului cosmologic menţionat (să-i zicem model S.O.E.: model staţionar, omogen, euclidian).

În ce constau aceste dificultăţi?

Prima, denumită *paradoxul lui Olbers*, după numele omului de ştiinţă care l-a formulat în 1826, constă în faptul că, dacă admitem modelul S.O.E., tot cerul ar trebui să emită o lumină strălucitoare, asemănătoare luminii solare.

Într-adevăr, este uşor să ajungem la această concluzie dacă ne amintim că fluxul luminos ce cade pe o anumită suprafaţă scade invers proporţional cu pătratul distanţei r de la sursa luminoasă. În acelaşi timp, numărul de surse existente într-un strat sferic de rază r şi grosimea Δr (fig. 1) este direct proporţional cu r^2 şi egal cu $4\pi n r^2 \Delta r$, unde n este numărul mediu al surselor (stelelor) pe unitatea de volum. De aceea fluxul luminos al întregului strat nu depinde de r , ci este proporţional cu Δr .

Însumînd toate aceste straturi (dacă ele umplu spaţiul infinit), ajungem la concluzia că există un flux luminos infinit de mare, provenit de la toate stelele. Dacă ţinem seama de suprapunerea imaginilor stelelor sau de absorbţia luminii într-un asemenea model, deşi nu mai rezultă un flux infinit, tot cerul trebuie să fie umplut de stele şi, prin urmare, inundat de o lumină strălucitoare. Întrucît se ştie că în realitate acest fenomen nu se produce, rezultă că una din ipotezele admise este inexactă: sau densitatea stelelor nu este omogen distribuită în univers, sau universul nu este infinit.

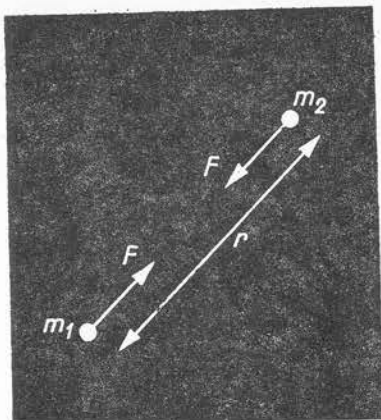


Fig. 2. Potrivit legii gravitației universale, toate corpurile se atrag. Forțele care acționează asupra maselor m_1 și m_2 sînt egale ca mărime, dar orientate în sens contrar (mărimea forțelor $F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$).

A doua dificultate a modelului S.O.E. apare cînd încercăm să-i aplicăm legile termodinamicii. Dacă universul este staționar și deci existența lui în timp este infinită, în el toate elementele ar fi avut timp să se „liniștească”, să ajungă într-o stare de echilibru, adică ar fi trebuit să intervină ceea ce se numește *moartea termică*. Or, așa ceva nu se observă.

A treia dificultate, cunoscută sub denumirea de *paradoxul lui Seeliger* (1895), se manifestă cînd încercăm să aplicăm modelului S.O.E. teoria gravitației universale a lui Newton.

După Newton, toate corpurile se atrag cu forțe invers proporționale pătratului distanței dintre ele. Două corpuri avînd masele m_1 și m_2 (fig. 2) se atrag cu o forță $F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$ (unde r este distanța dintre cele două mase, iar G este constanta gravitației, egală cu $6,670 \cdot 10^{-8} \frac{\text{cm}^3}{\text{g} \cdot \text{s}^2}$).

Datorită existenței atracției gravitaționale, cele două mase posedă o energie potențială gravitațională $U = -\frac{Gm_1m_2}{r}$. Aceasta înseamnă, în particular, că, pentru a îndepărta cele două corpuri la o distanță infinită, trebuie cheltuită o energie $\frac{Gm_1m_2}{r} = -U$ (considerăm energia U negativă, deoarece ea se micșorează cînd masele se apropie, iar pentru corpuri separate prin

distanțe foarte mari se admite că ea este egală cu 0). Se ajunge la următoarea formulare comodă și eficientă a teoriei newtoniene a gravitației: *fiecare corp creează în jurul său un câmp gravitațional care poate fi caracterizat printr-o anumită mărime, denumită potențial gravitațional φ* . În cazul unui corp sferic cu masa m_1 (de pildă o planetă), potențialul în exteriorul corpului la o distanță r de el este $\varphi = -\frac{Gm_1}{r}$. După cum reiese din cele spuse, forța gravitației F și energia interacțiunii gravitaționale U pot fi mai ușor exprimate în funcție de φ (de pildă $U = -\frac{Gm_1m_2}{r} = m_2\varphi$, unde $\varphi = -\frac{Gm_1}{r}$).

Un calcul simplu, asemănător celui la care am recurs mai sus, atunci cînd am expus paradoxul lui Olbers, arată că pentru orice corp energia gravitațională a interacțiunii lui cu toate masele (stelele) într-un univers infinit și omogen va fi infinită. În realitate, forța interacțiunii unui corp cu toate masele universului este nedeterminată. De aici rezultă clar că teoria newtoniană a gravitației sau nu poate fi deloc aplicată modelului cosmologic S.O.E., sau trebuie aplicată într-un fel care diferă de cel obișnuit. În orice caz, cosmologia preinsteiniană nu a reușit să rezolve această problemă.

Așadar, modelul cosmologic staționar, omogen și euclidian, care pare simplu la prima vedere, în realitate ascunde numeroase dificultăți.

Pentru a înlătura contradicțiile și a rezolva paradoxurile trebuie să schimbăm ceva în premisele de la care pornim. Există, desigur, foarte multe posibilități de a o face. De pildă, putem considera legea gravitației universale a lui Newton suficient de precisă pentru calculul traiectoriilor planetelor, dar pasibilă de modificări atunci cînd se trece la distanțe cosmice¹. Dar pentru a aduce modificări unei teorii, mai ales

¹ Vom menționa un exemplu care are o semnificație istorică: înlocuirea potențialului $\varphi = -\frac{Gm}{r}$ prin $\varphi' = \frac{Gm}{r} e^{-r/R}$. În acest

caz, paradoxul lui Seeliger dispăre; totodată, alegînd o constantă R suficient de mare, putem face ca φ și φ' să fie oricît de apropiate unul de altul pentru orice distanță dată r . În ceea ce privește ecuațiile pe care le satisfac potențialele φ și φ' , vezi anexa de la sfîrșitul acestei expunerii.

unei teorii fundamentale cum este aceea a lui Newton, ar trebui să avem un far călăuzitor, să ne sprijinim pe o teorie mai generală sau pe observații noi. În cosmologia preeinsteiniană nu a putut fi găsit un astfel de far călăuzitor. De-abia teoria relativității generalizate a constituit un impuls pentru dezvoltarea cosmologiei pe baza unor noi idei și reprezentări.

Aplicarea acestei teorii în cosmologie a fost inaugurată tocmai prin lucrarea lui Einstein din 1917, pe care am menționat-o la începutul expunerii noastre. Trebuie să menționăm totuși că un progres esențial în cosmologie este posibil chiar în cadrul teoriei newtoniene. Lucrul acesta a ieșit însă la iveală abia în 1934. Vom mai reveni la această problemă. Deocamdată să facem câteva observații cu privire la teoria relativității; ele sînt necesare pentru a înțelege ideile și concluziile cosmologice care se bazează pe ea.

Teoria relativității restrînse¹

Viteza luminii este viteza maximă posibilă a propagării oricăror semnale. Teoria relativității restrînse și toate legile fizicii care concordă cu ea corespund acestei afirmații privind propagarea semnalelor cu o viteză finită și nu infinită.

În mecanica clasică (newtoniană) s-a constatat că există sisteme inerțiale de referință în cadrul cărora este respectată prima lege a lui Newton (un corp suficient de depărtat de toate celelalte se deplasează cu o mișcare uniformă și rectilinie sau se află în stare de repaus). În cadrul sistemelor inerțiale este valabilă și legea a treia a lui Newton (acțiunea este egală cu reacțiunea). Un exemplu de sistem inerțial este sistemul de coordonate care are originea în centrul Soarelui, iar axele îndreptate spre stele sau galaxii depărtate.

În sistemele de referință neinertiale, din care face parte Pămîntul în rotație, prima și a treia lege a lui Newton nu mai sînt valabile. Aceasta devine limpede dacă raționăm în felul următor: într-un sistem inerțial oarecare, un corp se mișcă pe baza legii

¹ În acest capitol și în următoarele nu ne vom ocupa decît foarte succint de principiile teoriei relativității restrînse și ale teoriei relativității generalizate. Deoarece volumul și caracterul acestei lucrări nu ne permit să le expunem complet și sistematic, ne vom mulțumi să menționăm și să subliniem doar câteva elemente.

inerției, adică uniform și rectiliniu; dacă însă vom considera același corp, alegînd un sistem de referință în rotație, vom constata că traiectoria lui este o spirală și că, prin urmare, legea inerției este încălcată.

În mecanica clasică, toate sistemele inerțiale care se deplasează uniform și rectiliniu unele față de celelalte se află în situații echivalente. Această afirmație este denumită *principiul relativității*. Teoretic s-a demonstrat însă că, atunci cînd folosim reprezentările clasice privind spațiul și timpul, principiul relativității trebuie să fie încălcat în domeniul fenomenelor optice. Or, observațiile arată că principiul relativității este absolut valabil și în optică (în mod concret viteza de propagare a luminii se dovedește absolut identică în toate sistemele inerțiale).

Problema pe care a rezolvat-o teoria relativității restrînse (1905) a constatat tocmai în înlăturarea contradicției de mai sus. Aceasta s-a putut face datorită stabilirii unor noi legi (relativiste) de transformare a coordonatelor și a timpului atunci cînd se trece de la un sistem inerțial de referință la altul. Cu alte cuvinte, s-a clarificat în ce fel, cunoscînd coordonatele și timpul unui eveniment (de exemplu ale izbucnirii unui fulger) într-un sistem, putem găsi coordonatele și timpul aceluiași eveniment în orice alt sistem inerțial de referință.

Pentru simplificare să presupunem că cele două sisteme K și K' se deplasează unul față de altul de-a lungul uneia dintre axele de coordonate (axele x și x') cu o viteză v (fig. 3). În sis-

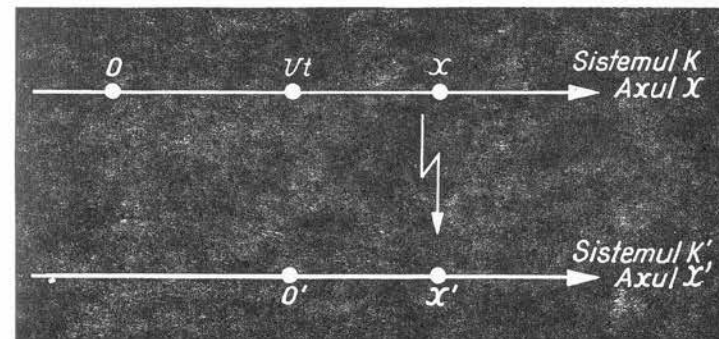


Fig. 3. Două sisteme inerțiale de referință. Sistemul K' se deplasează cu o viteză v în raport cu sistemul K .

temul K , „evenimentului“ îi corespund coordonata x și timpul t , respectiv în sistemul K' evenimentul are coordonata x' și timpul t' . Se admite că în momentul $t = 0$ originile coordonatelor (O și O' în sistemele K și K') coincid. În acest caz,

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}; \quad t' = \frac{t - (v/c^2)x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Aceste formule poartă denumirea de *transformările lui Lorentz*. Mărimea c , care figurează în ele, este viteza luminii; $c = 3 \cdot 10^{10}$ cm/s. Dacă viteza v de deplasare a unui sistem față de celălalt este mică în comparație cu viteza luminii, sînt valabile cu aproximație *transformările lui Galilei*:

$$x' = x - vt; \quad t' = t.$$

În fizica clasică (prerelativistă) aplicabilitatea transformărilor lui Galilei era considerată necondiționată și nelimitată. Potrivit fizicii clasice, timpul se scurge la fel în toate sistemele de referință, independent de viteza cu care se deplasează unele față de celelalte. Cu alte cuvinte, transformările lui Galilei presupun un timp absolut.

Potrivit transformărilor lui Lorentz, dimpotrivă, timpul se scurge în mod diferit în sisteme de referință diferite. Se spune uneori că teoria relativității a transformat lumea noastră tridimensională plus timpul într-o lume unitară cu patru dimensiuni (spațiul-timp). Această afirmație este justă numai în sensul că în teoria relativității timpul și-a pierdut caracterul absolut și, asemenea coordonatelor, se transformă atunci cînd se trece de la un sistem de referință la altul.

În fizica clasică existau, bineînțeles, motive temeinice pentru a folosi transformările lui Galilei și ideea unui timp absolut, deoarece vitezele care se întîlnesc în viața cotidiană și chiar în astronomie sînt considerabil mai mici decît viteza luminii. Ajunge să menționăm că viteza cu care Pămîntul se mișcă în jurul Soarelui este egală cu $3 \cdot 10^6$ cm/s, fiind de zece mii de ori mai mică decît viteza luminii. De altfel, cînd avem de-a face cu viteze mici, diferența dintre transformările lui Lorentz și transformările lui Galilei se exprimă în termeni de ordinul v^2/c^2 , nu de ordinul v/c . Așadar, pentru mișcarea Pămîntului în jurul Soarelui, precizia transformărilor lui Galilei este de ordinul $v^2/c^2 = 10^{-8}$. Sateliții Pămîntului se deplasează în raport cu

suprafața Pămîntului cu o viteză care nu depășește $8 \cdot 10^5$ cm/s, așa încît corecțiile pentru transformarea relativistă sînt aici și mai mici decît în cazul mișcării Pămîntului în jurul Soarelui.

În fizica microcosmosului, ca și în cosmologie, întîlnim însă viteze foarte apropiate de c (viteza luminii). Afară de aceasta, precizia unor experiențe este atît de mare, încît putem distinge transformările lui Galilei de transformările lui Lorentz chiar în cazul mișcării Pămîntului în jurul Soarelui. Teoria relativității restrînse a apărut tocmai atunci cînd, sub presiunea faptelor, a devenit imposibilă ocolirea ei.

Teoria relativității restrînse este indisolubil legată de ideea (bazată, bineînțeles, pe datele experienței) că viteza luminii este o viteză-limită: viteza maximă posibilă pentru propagarea oricărui semnal purtător de energie care poate produce un efect (să aprindă un bec, să pună în acțiune un numărător de particule etc.).

Caracterul de limită al vitezei luminii este într-o anumită măsură oglindit în transformările lui Lorentz, deoarece radicalul $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ devine imaginar în cazul unei viteze v mai mari decît c . În felul acesta, ipoteza existenței unei acțiuni instantanee la distanță este incompatibilă cu teoria relativității restrînse. Să luăm, de pildă, două sarcini în repaus de același semn e_1 și e_2 (fig. 4). Potrivit legii lui Coulomb, sarcinile e_1 și e_2 se resping cu o forță $F = \frac{e_1 e_2}{r^2}$, îndreptată în lungul liniei care unește cele două sarcini (se vede că legea lui Coulomb este un analog al legii gravitației universale a lui Newton).

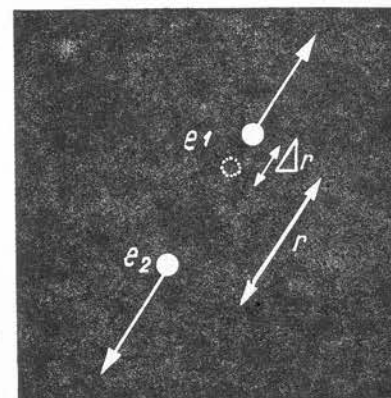


Fig. 4. Cînd sarcina e_1 se deplasează cu o distanță Δr , sarcina e_2 va „resimți” modificarea forței de-abia după un interval $t_{întîrziere} = \frac{r}{c}$.

Să apropiem acum sarcina e_1 de sarcina e_2 , și anume cu o distanță Δr . Pe baza legii lui Coulomb, forța care acționează între sarcini trebuie să se modifice imediat și să devină egală cu $\frac{e_1 e_2}{(r - \Delta r)^2}$. În realitate, sarcina e_2 va „simți” modificarea forței

abia după un interval de timp $t_{\text{întîrziere}} = \frac{r}{c}$ din momentul deplasării sarcinii e_1 . Tocmai de aceea este just să spunem că legea lui Coulomb este o lege a electrostaticii, în timp ce în electrodinamică pentru sarcinile care se deplasează sînt valabile legi mai generale, care concordă cu caracterul finit (și nu infinit) al vitezei de propagare a oricăror perturbații.

Electrodinamica creată în secolul al XIX-lea de Faraday și Maxwell se află în concordanță cu principiul caracterului finit al vitezei luminii, din care cauză teoria relativității restrînsă nu a modificat-o în fond. A fost însă nevoie de o generalizare a mecanicii lui Newton, adică de construirea unor legi mai generale ale mecanicii, care să se reducă la legile lui Newton în cazul corpurilor cu o viteză suficient de mică.

De altfel, anumite modificări s-au introdus și în legile electrodinamicii ce acționează în cazul existenței unui mediu de propagare, precum și în alte capitole ale fizicii. O asemenea problemă — modificarea legilor fizicii în concordanță cu cerințele teoriei relativității restrînsă — a apărut și în ceea ce privește gravitația. Această problemă s-a dovedit a fi deosebit de dificilă și rezolvarea ei a dus la crearea teoriei relativității generalizate.

Teoria relativității generalizate

Teoria relativității generalizate reprezintă teoria gravitației pusă de acord cu principiul caracterului finit al vitezei de propagare a oricăror „semnale”, inclusiv a gravitației. Potrivit teoriei relativității generalizate, gravitația se manifestă în caracterul neeuclidian al spațiului și al timpului.

Este evident că teoria gravitației universale a lui Newton, în cadrul căreia forțele acționează la distanță în mod instantaneu, nu satisface exigențele teoriei relativității. Succesul teoriei lui Newton se datorește faptului că ea a fost aplicată la început pentru explicarea mișcării planetelor, care, după cum

am mai amintit, se caracterizează prin viteze mult mai mici decît viteza luminii. De aceea, în mecanica cerească, termenii de corecție determinați de întîrzierea luminii și, în general, de caracterul finit al vitezei ei sînt foarte mici. Aceasta se înțelege ușor dacă facem următoarea comparație: lumina parcurge distanța de la Pămînt pînă la Soare în 8 minute, interval de timp de 60 000 de ori mai scurt decît un an, respectiv perioada de revoluție a Pămîntului în jurul Soarelui.

În felul acesta, devine clar că teoria gravitației a lui Newton poate fi numită gravitostatică, în analogie cu electrostatica, în care domnește legea lui Coulomb. Necesitatea creării unei teorii relativiste a gravitației a fost înțeleasă imediat după elaborarea teoriei relativității restrînsă. Problema s-a dovedit însă a fi deosebit de complexă și elaborarea teoriei relativiste a gravitației — teoria relativității generalizate — i-a cerut lui Einstein aproape zece ani și a solicitat eforturi cu adevărat titanice.

Trebuie să avem în vedere că se pot propune mai multe teorii ale gravitației care să satisfacă exigențele teoriei relativității restrînsă. Numai una dintre ele corespunde însă realității. Desigur, ca totdeauna în științele naturii, teoria corectă poate fi identificată pe baza confruntării teoriilor cu experiența și cu observațiile.

În perioada la care ne referim nu se făcuseră încă observații hotărîtoare de această natură. Și totuși Einstein a găsit soluția justă, care de altfel, nu era cea mai simplă. Într-adevăr, lucrul cel mai simplu ar fi fost să se generalizeze teoria newtoniană a gravitației, considerînd, ca și mai înainte, potențialul de gravitație φ drept mărime scalară, adică identică în toate sistemele de referință. În acest caz se schimbă sau mai exact se completează numai ecuația pe care trebuie să o satisfacă potențialul φ . Dacă în ecuația nouă, completată, viteza luminii va fi considerată formal infinită (este vorba de examinarea unor mișcări cu viteze de o mărime neglijabilă în comparație cu viteza c a luminii), această nouă ecuație se reduce, bineînțeles, la ecuația veche, care determină potențialul newtonian. O asemenea teorie relativistă a gravitației nu numai că este posibilă în principiu, dar a și fost efectiv dezvoltată, în special de fizicianul german Nordström, tocmai în perioada cînd Einstein își elabora teoria relativității generalizate. De altfel, și Einstein a început de la o asemenea teorie scalară a gravi-

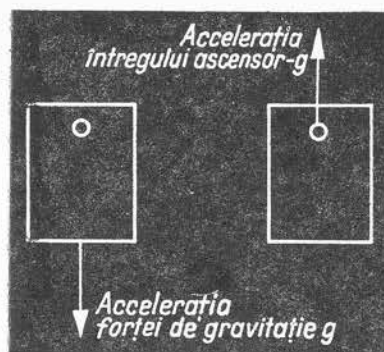


Fig. 5. „Ascensorul” lui Einstein.

tației, dar în curînd s-a convins că trebuie să apuce pe o altă cale.

Elementul esențial pentru elaborarea teoriei relativității generalizate este sesizarea profunde legături dintre gravitație și geometria spațiului-timp sau, cu alte cuvinte, dintre geometria spațiului nostru tridimensional și cinematică (dependența coordonatelor diverselor evenimente de timp).

Existența unei asemenea legături poate fi lămurită folosind exemplul ascensorului propus încă de Einstein. Să ne închipuim cabina închisă a unui ascensor obișnuit, în două situații. În primul caz, ascensorul se află pe suprafața pământului. Câmpul gravitației terestre poate fi considerat în acest caz, cu o foarte mare precizie, omogen în limitele cabinei, și deci în orice colț al ascensorului corpurile vor cădea avînd aceeași

acelerație a gravitației (vezi fig. 5: vectorul $\vec{g}$, egal ca lungime cu g , este orientat după cum arată săgeata). În al doilea caz, să ne închipuim același ascensor în spațiul interstelar, departe de toate stelele și să-i imprimăm ascensorului în ansamblu accelerația $-\vec{g}$. În această situație, toate corpurile se vor deplasa în ascensor (în raport cu pereții lui) exact ca în primul caz, adică vor cădea pe fundul ascensorului cu accelerația $\vec{g}$. Această echivalență a celor două sisteme în ceea ce privește mișcările mecanice era cunoscută de foarte mult timp; ea constituie o consecință directă a egalității „masei inerte” a corpului m_i cu masa „greă” m_g a aceluiași corp. În virtutea acestei egalități, de obicei este folosită o singură noțiune de masă

$m = m_i = m_g$. În legătură cu aceasta va trebui să mai lămurim unele lucruri.

Legea a doua a lui Newton sau, cum se spune, *ecuația mișcării* este următoarea: masa unui corp înmulțită cu accelerația lui, $\vec{a}$, este egală cu forța $\vec{F}$ care acționează asupra corpului. Masa care figurează în această lege caracterizează inerția corpului și se numește *masă inertă*, m_i . Prin urmare, $m_i \cdot \vec{a} = \vec{F}$. Totodată, dacă forța F este forța newtoniană a gravitației universale, ea este proporțională cu masa corpului, dar nu avem apriori motive să considerăm această masă (masa „greă” m_g) riguros egală cu masa m_i . Cu toate acestea, experiența confirmă egalitatea maselor m_i și m_g , această egalitate fiind stabilită astăzi cu o precizie fantastică (diferența dintre masele m_i și m_g este de cel puțin 30 de miliarde de ori mai mică decît masa $m_i = m_g$). Întrucît masele m_i și m_g sînt egale, toate corpurile, independent de masa lor, se vor deplasa în câmpul gravific absolut la fel (în câmpul gravific, masa $m = m_i = m_g$ pur și simplu se simplifică în ecuația mișcării). Așa se și petrec lucrurile, de pildă, în eazul căderii corpurilor în vid.

În mecanica lui Newton, egalitatea masei inerte și a masei grele este doar constatată, fără să fie nici explicată, nici folosită pentru înțelegerea naturii gravitației. Einstein însă a luat egalitatea masei grele și a masei inerte drept punct de pornire pentru crearea noii teorii a gravitației.

După cum am mai spus, aflîndu-ne în ascensor nu putem distinge dacă asupra mișcării corpurilor acționează un câmp de gravitație $\vec{g}$ omogen în spațiu și constant în timp, sau întreg ascensorul este uniform accelerat (cu o accelerație egală cu $-\vec{g}$). Este firesc să se presupună — ceea ce a și făcut Einstein — că o asemenea echivalență are loc literalmente pentru toate procesele și fenomenele fizice și nu numai pentru mișcările mecanice. În felul acesta ajungem tocmai la acel *principiu al echivalenței* care stă la baza teoriei relativității generalizate.

Dacă un câmp gravitațional omogen și constant acționează asupra tuturor proceselor fizice exact la fel ca o accelerație uniformă a sistemelor de referință, atunci orice câmp gravita-

țional poate fi legat de geometrie și de cinematică. Într-adevăr, în limitele unei regiuni suficient de mici a spațiului și în decursul unui interval de timp suficient de mic, orice câmp de gravitație poate fi considerat omogen și constant. De aceea, în orice regiune mică a spațiului-timp, câmpul gravitațional poate fi „eliminat” (adică acțiunea lui poate fi lăsată la o parte) dacă alegem un sistem de referință accelerat.

Închipuindu-ne un sistem de referință oarecum „fluid”, a cărui accelerație să difere în diverse puncte, putem elimina și câmpuri gravitaționale mai complexe. Aceasta nu înseamnă însă că orice câmp gravitațional poate fi „pentru totdeauna” lichidat prin alegerea sistemului de referință. De exemplu, câmpul gravific al Pământului este orientat spre centrul lui și poate fi eliminat pentru un timp, dacă alegem un sistem de referință care cade liber spre centrul Pământului. Dar este absolut limpede că folosirea unui asemenea sistem care cade liber este limitată în timp. Prin urmare, nu este vorba de a „reduce” complet câmpul gravific la alegerea sistemului de referință. Putem constata doar că orice câmp gravitațional este în întregime caracterizat prin mărimile care definesc proprietățile spațiului și ale timpului.

Aceste mărimi sînt în număr de zece și în ansamblul lor poartă denumirea de *tensor metric*, fiind notate cu ajutorul simbolului g_{ik} . Sensul notației g_{ik} este următorul: indicii i și k corespund coordonatelor x, y, z și timpului t , stabilindu-se de obicei următoarea corespondență: pentru t indicele 0, pentru x indicele 1, pentru y indicele 2 și pentru z indicele 3. Mărimile g_{10} și g_{01} și cele analoge sînt egale între ele, așa încît există efectiv 10 mărimi independente: $g_{00}, g_{11}, g_{22}, g_{33}, g_{10}, g_{20}, g_{30}, g_{12}, g_{13}, g_{23}$, care pot fi notate sub forma simbolică menționată g_{ik} . Cînd se trece de la un sistem de coordonate spațio-temporale la un alt sistem de referință, se schimbă atît coordonatele x, y, z și t ca atare, cît și mărimile g_{ik} .

Există însă și alte mărimi care nu depind de sistemul de referință sau, cum se spune, sînt invariante. Să explicăm faptul acesta folosind exemplul unui plan pe care se află două puncte apropiate. Distanța dintre aceste puncte, Δr , nu depinde de alegerea sistemului de coordonate pe plan. În coordonatele rectangulare, cel mai curent folosite, x și y , pătratul distanței este $(\Delta r)^2 = (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2$, unde Δx și

Δy sînt diferențele dintre coordonatele x și, respectiv, y ale punctelor considerate. Dacă alegem un sistem oarecare de coordonate x' și y' în același plan, vom avea:

$$(\Delta r)^2 = g_{11} (\Delta x')^2 + 2 g_{12} \Delta x' \cdot \Delta y' + g_{22} (\Delta y')^2.$$

Situații asemănătoare vom avea pentru spațiul tridimensional (cu coordonatele x, y, z) și pentru spațiul-timp evadri-dimensional (cu coordonatele x, y, z și t). Cu ajutorul mărimilor g_{ik} se pot exprima toate proprietățile spațiului-timp, între altele putem determina distanțele dintre orice evenimente ale căror coordonate sînt cunoscute.

Așadar, în teoria relativității generalizate, câmpul gravitațional este descris de mărimile g_{ik} , care într-un anumit sens iau locul unei singure mărimi: potențialul newtonian φ .

Câmpul gravitațional este considerat slab dacă potențialul φ este mic în comparație cu c^2 (sau, cu alte cuvinte, dacă viteza corpurilor care se mișcă în câmpul φ este mică în comparație cu viteza luminii c).

Dacă nu există nici un fel de corpuri (practic la o distanță mare de toate corpurile masive), se poate introduce un sistem inertial de referință în care $g_{11} = g_{22} = g_{33} = -1, g_{00} = 1$, iar toate celelalte g_{ik} sînt egale cu zero. Plasînd în acest sistem de referință un corp oarecare nesupus mișcării de rotație (de exemplu o stea), care creează un câmp gravitațional slab, vom avea: $g_{11} = g_{22} = g_{33} = -1, g_{12} = g_{23} = g_{10} = g_{20} = g_{30} = 0$, iar $g_{00} = 1 + \frac{2\varphi}{c^2}$.

În felul acesta revenim de fapt la teoria newtoniană. Chiar pe suprafața Soarelui, $\varphi/c^2 = - \frac{GM_s}{r_s c^2} = -2,12 \cdot 10^{-6}$ (masa Soarelui $M_s = 1,99 \cdot 10^{33} \text{g}$, raza Soarelui $r_s = 6,96 \cdot 10^{10} \text{cm}$), adică mărimea g_{00} este foarte apropiată de unitate, așa încît aproximația newtoniană se dovedește a fi foarte bună.

Cu toate acestea, chiar în limitele sistemului solar putem observa abateri de la teoria lui Newton. Einstein a indicat trei asemenea efecte ale teoriei relativității generalizate care pot fi observate în limitele sistemului solar. Și, într-adevăr, ele au fost toate constatate. Primul efect constă în modificarea frecvenței luminii atunci cînd ea se propagă într-un câmp gravific, al doilea constă într-o rotire suplimentară a orbitelor planetelor și sateliților, iar al treilea efect este devierea razelor

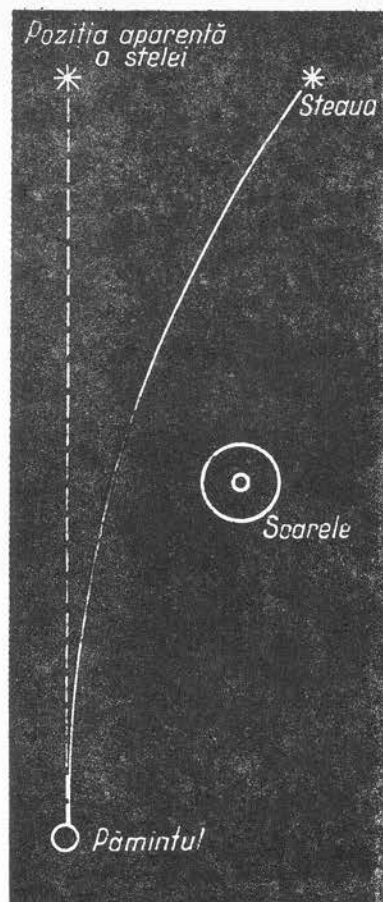


Fig. 6. Soarele deviază razele de lumină care trec în apropierea lui (în figură, devierea razelor este mult exagerată).

¹ Actuala situație a acestei probleme este pusă în lumină, între altele, de pildă în articolul autorului intitulat *Cercetările cosmice și teoria relativității* și inclus în culegerea *Einstein* din 1967, Editura „Nauka”, Moscova.

de lumină care trec în vecinătatea Soarelui. Spațiul restrâns ne pune în imposibilitatea de a insista aici cât de cât mai amănunțit asupra problemelor privitoare la verificarea teoriei relativității generalizate¹, așa încât ne vom opri pentru exemplificare numai la fenomenul devierii razelor de lumină. El constă în faptul că poziția aparentă a stelelor pe cer se schimbă dacă razele lor de lumină trec prin apropierea Soarelui (fig. 6). Pentru constatarea acestei devieri se fotografiază cerul în timpul unei eclipse totale de Soare spre a se putea fixa poziția stelelor a căror lumină trece în apropierea strălucitorului disc solar. După un timp (să zicem după o jumătate de an), Soarele se va afla, în virtutea mișcării anuale a Pământului, într-o altă regiune a cerului sideral și vom putea obține fotografia acelorași stele ca în primul caz, dar în condiții când razele de lumină practic nu mai sînt deviate.

Devierea razei, chiar dacă ea trece foarte aproape de discul solar, nu depășește $1''.75$ de arc (este unghiul sub care am vedea, de pildă, un om de la distanța de 200 km). Această deviere a putut fi măsurată pentru prima dată în 1919; ulterior a mai fost măsurată de vreo zece ori. Observațiile confirmă efectul indicat de teoria relativității generalizate, în limitele preciziei atinse, de aproximativ 10%. Trebuie să arătăm că teoria relativistă scalară a gravitației, pe care am menționat-o, nu presupunea devierea razelor de lumină și de aceea o putem considera total infirmată¹.

Faptul că razele de lumină se propagă în apropierea corpurilor pe drumuri care nu sînt linii drepte reflectă, poate, consecința cea mai profundă a teoriei relativității generalizate. Tocmai în prezența cîmpurilor gravitaționale spațiul încetează de a mai fi euclidian; același lucru se poate spune și despre spațiul-timp evadridimensional.

Spațiul neeuclidian nu are nimic enigmatic. De pildă, pe o suprafață sferică geometria nu este euclidiană și, bunăoară, suma unghiurilor unui triunghi nu este egală cu 180° . Desigur, este destul de greu să ne imaginăm un spațiu neeuclidian tridimensional închis, dar unele devieri, relativ mici, de la geometria euclidiană sînt absolut accesibile simțurilor.

Părerea că geometria spațiului real (a universului) este o geometrie euclidiană constituie o generalizare a experienței cotidiene, dar, atunci cînd trecem la distanțe mari sau folosim măsurări cu o precizie destul de mare, ea se poate dovedi inexactă. Această concluzie au tras-o încă în secolul trecut Gauss, Lobacevski și Riemann, după crearea geometriei neeuclidiene.

¹ Întrucît devierea razelor de lumină prezisă de teoria relativității generalizate a fost măsurată numai cu o precizie de aproximativ 10%, în prezent mai este admisibilă, în principiu, folosirea teoriei „mixte” a gravitației. În această teorie, cîmpul gravitațional este definit, în afară de g_{ik} , și de potențialul scalar ϕ , care își aduce contribuția la forța gravitației (această contribuție neputînd, desigur, depăși cea 10%). Marea majoritate a fizicienilor, printre care și autorul prezentei lucrări, nu văd nici un motiv pentru admiterea unei asemenea teorii, dar din punct de vedere experimental mai există, fără îndoială, puncte obscure; teoria „mixtă” își are adepții ei și — ceea ce este esențial — concluziile ei sînt în prezent în curs de verificare (în S.U.A.). De aceea am găsit de cuviință să o menționăm.

Teoria relativității generalizate arată că, într-adevăr, spațiul (și spațiul-timp) nu este euclidian, iar experiența a confirmat această concluzie. Geometria spațiului-timp este determinată de materie, depinde de ea. Se poate spune că gravitația este integral reflectată în devierea geometriei spațiului-timp de la geometria euclidiană. De aici rezultă cu o deosebită claritate că, de fapt, câmpul gravitațional nu se reduce deloc la cinematică, nu poate fi în întregime creat sau „eliminat” prin alegerea sistemului de referință. Într-adevăr, oricum am alege sistemul de referință (coordonatele) în spațiul euclidian, prin aceasta spațiul nu va deveni neeuclidian. Cu alte cuvinte, caracterul neeuclidian al spațiului este un semn al existenței unui câmp gravitațional „autentic”.

Lumea sferică a lui Einstein

Pe baza teoriei relativității generalizate, creatorul ei, Albert Einstein, a propus în 1917 un nou model al universului.

Potrivit acestui model, universul este un spațiu tridimensional închis (o sferă tridimensională), al cărui volum este finit și nu se modifică în timp.

După cum am văzut, cosmologia preeinsteiniană s-a lovit de dificultăți serioase. Modelul staționar, omogen, euclidian (S. O. E.), deși pare firesc, este în mod evident „necorespunzător”. Așadar, trebuie să renunțăm cel puțin la unul dintre cele trei principii fundamentale pe care se sprijină acest model: la caracterul staționar, la caracterul omogen sau la caracterul euclidian al spațiului. Mai există, ce-i drept, încă o posibilitate: modificarea teoriei newtoniene a gravitației universale. Teoria relativității generalizate a generalizat teoria newtoniană a gravitației, înlăturând contradicția ce exista între ea și principiul caracterului finit al vitezei de propagare a oricăror interacțiuni. Cu acest prilej a reieșit că geometria spațiului nu este, în general vorbind, euclidiană.

În această situație este cu totul firesc faptul că cosmologia modernă, care se bazează pe teoria relativității generalizate, a început să se dezvolte pe calea renunțării nu la caracterul staționar sau omogen al universului, ci la caracterul lui euclidian. Universul lui Einstein, care s-a născut în lucrarea lui din 1917, este o lume sferică tridimensională.

Trăim într-o lume tridimensională. Formal vorbind, aceasta înseamnă că poziția oricărui punct este definită de trei mărimi (trei coordonate ale unui punct într-un sistem oarecare de referință). Suprafețele cu care avem de-a face în mod uzual sînt formații bidimensionale, iar liniile sînt formații unidimensionale. Suprafața Pămîntului este și ea, evident, bidimensională și reprezintă, cu o precizie suficientă, o sferă. Lucrul acesta îl știu astăzi pînă și copiii de vîrstă școlară și se pare că faptul acesta nu-i uimește. A fost însă un timp cînd forma sferică a Pămîntului și, legat de aceasta, admiterea existenței unor antipodii erau considerate absurde. Abia călătoria lui Magellan în jurul Pămîntului, care s-a încheiat la 6 septembrie 1522, a pus capăt îndoielilor sau, în orice caz, a demonstrat că nu există un „capăt” al Pămîntului.

Sfera tridimensională¹ se aseamănă cu sfera bidimensională; se poate spune că ea reprezintă o treaptă superioară față de sfera obișnuită, așa cum sfera obișnuită, bidimensională, este o treaptă superioară față de „sfera unidimensională”: circumferința. Este evident că o sferă tridimensională nu are „capăt”, dar volumul ei este finit, după cum este finită și suprafața unei sfere bidimensionale².

Că Pămîntul nu este plan putem să ne convingem chiar și fără să-i facem ocolul. De pildă, încă în vremurile antice s-a

¹ Prin „sferă bidimensională” se înțelege suprafața sferică așa cum o definește geometria: locul geometric al punctelor din spațiul cu trei dimensiuni situate la o distanță egală cu R de un punct fix, numit centru (sau, cu alte cuvinte, suprafața care își menține mereu aceeași curbura), așa cum prin cerc se înțelege linia ale cărei puncte sînt egal depărtate de un punct numit centru. Deci „sfera tridimensională” nu este volumul, globul delimitat de sfera bidimensională, ci este o „figură” în spațiul cu patru dimensiuni care își menține mereu aceeași curbura sau are o curbura constantă. Așa cum sfera din spațiul cu trei dimensiuni are două dimensiuni (pe Pămînt latitudinea și longitudinea) și o arie, sfera din spațiul cu patru dimensiuni are trei dimensiuni și un volum ($N.T.$).

² Volumul unei sfere tridimensionale cu raza R este egal cu $2\pi^2 R^3$, în timp ce aria unei sfere bidimensionale este egală cu $4\pi R^2$, iar volumul porțiunii din spațiul euclidian tridimensional mărginit de ea (volumul unei sfere obișnuite) este egal cu $\frac{4\pi}{3} R^3$. Globul, corpul delimitat de sfera bidimensională, este limitat, în timp ce sfera tridimensională nu este.

observat că, atunci cînd o corabie se depărtează de țărm, întîi dispare corpul ei și abia după aceea catargele. Această observație a fost just interpretată: a apărut ipoteza că Pămîntul este sferic. Ce-i drept, catargul corăbiei nu se mai află pe suprafața Pămîntului, ci în dimensiunea a treia. Putem însă să ne convingem de forma sferică a Pămîntului și cu ajutorul unor măsurători efectuate numai pe suprafața lui: este suficient să constatăm că suma unghiurilor unui triunghi sferic este mai mare de două unghiuri drepte, adică de 180° .

La fel, observațiile făcute de pe Pămînt ne permit să constatăm în principiu dacă suprafața înconjurătoare este euclidiană sau nu. Devierea razelor de lumină în apropierea Soarelui demonstrează că o anumită „stare neeuclidiană locală” există într-adevăr. Dar în modelele unui univers omogen asemenea devieri locale, în general vorbind, sînt neglijate; e vorba de curbura „medie” a spațiului (folosind în continuare analogia cu suprafața Pămîntului, putem spune că se are în vedere curbura Pămîntului „netezit”, fără munți și depresiuni).

Pentru a găsi raza de curbură a universului trebuie să măsurăm distanțe enorme, de ordinul cîtorva miliarde de ani-lumină. De aceea nu este de mirare că nici pînă astăzi raza de curbură a universului nu a fost măsurată și, mai mult decît atît, nu s-a demonstrat că volumul lui este finit. Cu toate acestea se poate afirma că, dacă volumul este totuși finit (ceea ce este pe deplin posibil), atunci raza lumii în epoca noastră, ca ordin de mărime, este egală cu 10^{10} ani-lumină, respectiv 10^{28} cm (de unde volumul $V = 2\pi^2 R^3$ este de ordinul a 10^{85} cm³).

Lumea lui Einstein, după cum am arătat, este tocmai o astfel de lume: neeuclidiană, închisă (o sferă tridimensională), omogenă în medie și invariantă în timp.

Propunînd un asemenea model sferic al universului, Einstein a încercat să stabilească cu ajutorul ecuațiilor teoriei relativității generalizate o legătură între raza de curbură R_E și densitatea medie a substanței în lume ρ_E (indicele E amintește că este vorba de modelul lui Einstein). A reieșit

Această deosebire este reflectată și în inegalitatea volumelor $2\pi^2 R^3$ și $\frac{4\pi}{3} R^3$. Sfera tridimensională este un exemplu de spațiu tridimensional neeuclidian (în mod concret este un spațiu cu o curbură constantă).

însă că ecuațiile pentru cîmpul gravitațional, respectiv tensorul metric g_{ik} , stabilit de Einstein anterior (sub formă definitivă în anul 1915), nu au soluții corespunzătoare! S-ar părea că de aici urmează că în cadrul teoriei relativității generalizate modelul staționar are un caracter contradictoriu.

De fapt, lucrurile nu stau așa sau nu stau chiar așa, deoarece ecuațiile admit o generalizare simplă (și una singură), anume: la ele poate fi adăugat un termen de forma λg_{ik} (vezi anexa de la sfîrșitul lucrării). În felul acesta se introduce în teorie o nouă constantă, notată de Einstein cu litera grecească λ . De aceea, și noul termen care apare în ecuațiile de gravitație a primit denumirea de termen *lambda* (de obicei se scrie termen Λ , folosind majusecula). Ecuațiile pentru cîmpul g_{ik} care cuprind termenul Λ au o soluție sferică independentă de timp (o soluție staționară sau, cum se mai poate spune, statică) și în acest caz raza de curbură a spațiului este

$$R_E = \frac{1}{\sqrt{\Lambda}},$$

iar densitatea medie a materiei în lume

$$\rho_E = \frac{c^2 \Lambda}{4\pi G},$$

$$\text{deci } R_E = \frac{c}{\sqrt{4\pi G \rho_E}}.$$

Dacă considerăm $R_E = 10^{28}$ cm, vom avea

$$\Lambda = 10^{-56} \text{ cm}^{-2} \text{ și } \rho_E \approx 10^{-29} \text{ g/cm}^3.$$

Pentru hidrogenul în stare gazoasă cu o asemenea densitate, concentrarea atomilor este egală cu aproximativ 10^{-5} cm⁻³, ceea ce înseamnă că la un volum de 100 l revine un atom. În condițiile presiunii atmosferice și la temperatura camerei, într-un asemenea volum se găsesc aproximativ $5 \cdot 10^{34}$ atomi de hidrogen.

Întreaga masă a substanței într-un asemenea model este

$$M_E = 2\pi^2 R_E^3 \rho_E \approx 2 \cdot 10^{56} \text{ g},$$

adică de 10^{23} ori mai mare decât masa Soarelui, care este egală cu $2 \cdot 10^{33}$ g. Masa Galaxiei noastre, care face parte dintre marile galaxii spirale, este de aproximativ 10^{11} mase solare și deci în lumea lui Einstein cu parametri aleși mai sus ar putea încăpea 10^{12} galaxii asemănătoare Galaxiei noastre. Un număr atât de mare de galaxii nu se observă însă în universul real, chiar dacă folosim cele mai bune telescoape existente astăzi. Și totuși cifra 10^{12} este, într-adevăr, numărul, rezonabil evaluat, al galaxiilor existente în univers.

Toate acestea nu înseamnă însă că modelul lui Einstein ar fi fost confirmat. Dimpotrivă, s-a lămurit că acest model nu corespunde realității, deoarece universul nu este staționar: proprietățile lui se schimbă în timp. Mai concret, universul se dilată.

Cosmologia nestaționară a lui Fridman modelele newtoniene ale universului

În 1922 A.A. Fridman a ajuns la concluzia că, potrivit teoriei relativității generalizate, universul, în general vorbind, nu rămâne neschimbat în timp, ci, dimpotrivă, trebuie să se dilate sau să se contracte. De fapt însă, această concluzie nu este în mod necesar legată de teoria relativității generalizate și este în întregime inteligibilă și în cadrul teoriei gravitației universale a lui Newton.

Lumea sferică a lui Einstein este organic legată de ipoteza unui volum finit al universului, dar în timp această lume este neschimbată și vîrsta ei este infinită. Ipoteza potrivit căreia universul își schimbă volumul în timp, de pildă se dilată, este încă un pas, și chiar un pas mai decisiv, în direcția depărtării de modelul cosmologic clasic S. O. E.

Privind lucrurile din punct de vedere istoric, la concluzia că universul se dilată s-a ajuns pe două căi: ca urmare a observațiilor și pe cale teoretică, pe baza teoriei relativității generalizate. De-abia prin 1929 cele două căi au fuzionat definitiv într-un tot unitar.

Primele modele cosmologice nestaționare au fost construite în 1922 și 1924 de către savantul sovietic A. A. Fridman, fără vreo legătură cu observația. Fridman a arătat că ecuațiile teoriei relativității generalizate au soluții care corespund unui spațiu omogen, în care toate distanțele (de pildă distanțele dintre galaxii) se schimbă în timp. Densitatea medie a substanței care umple spațiul se modifică bineînțeles și ea în acest caz în mod corespunzător (astfel, odată cu dilatarea universului, densitatea medie a substanței scade). Fridman nu a eliminat termenul Λ , dar este limpede că și fără acest termen (adică în cazul $\Lambda = 0$) există soluții nestaționare de trei tipuri.

După cum am spus, termenul Λ a fost introdus de Einstein, care a văzut în aceasta o necesitate impusă de logica modelului staționar. Din punctul de vedere al cosmologiei nestaționare a lui Fridman, prezența termenului Λ nu este însă necesară, fiind legată de introducerea în teorie a unei constante nedeterminate suplimentare, a cărei valoare poate fi determinată numai confruntînd formulele obținute cu observația. Una dintre regulile generale ale fizicii teoretice sună însă astfel: dacă poți să nu introduci o nouă constantă, n-o introduce. De aceea, cum e și firesc, în primul rînd trebuie să discutăm și să confruntăm cu experiența modelele cosmologice ale lui Fridman fără termenul Λ ; cît privește modelele mai generale, ele vor fi analizate mai detaliat numai dacă pentru aceasta vor exista temeiuri suficiente.

Este interesant că în 1967 asemenea temeiuri au apărut într-adevăr; dar despre aceasta vom vorbi mai jos. Aici vom arăta care este comportarea în timp a modelelor fridmaniene fără termenul Λ (pentru concizie, în cele ce urmează vom denumi modele fridmaniene numai acele modele care nu au termenul Λ).

Aceste modele sînt — prin ipoteză, confirmată de observații — omogene și izotrope; densitatea medie a substanței la un moment dat este pretutindeni aceeași, iar toate direcțiile în spațiu sînt echivalente. Calculul valorii medii se face în acest caz în raport cu un volum mare, care include mai multe galaxii. Numai la asemenea dimensiuni mari are loc dilatarea sau, mai precis, îndepărtarea reciprocă a galaxiilor.

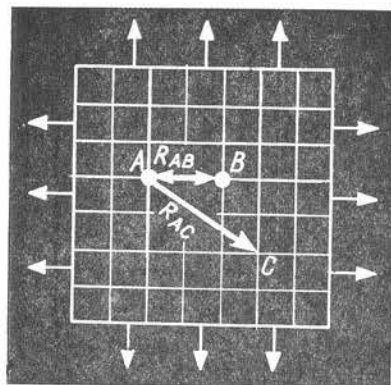
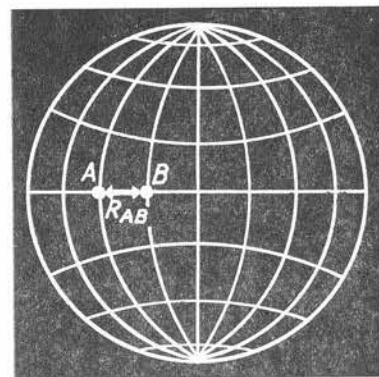


Fig. 7. O peliculă de cauciuc uniform întinsă în toate direcțiile, model bidimensional al spațiului euclidian în dilatare.

Sistemul solar, Galaxia noastră și chiar grupurile (asociațiile) de galaxii apropiate sînt legate prin forțe de gravitație și nu participă la dilatarea cosmologică generală, adică nu se extind. În această privință, situația este absolut analogă dilatării unui gaz alcătuit din molecule cu mai mulți atomi: distanțele dintre molecule cresc, dar moleculele înseși rămîn neschimbate, deoarece atomii care le formează sînt legați între ei.

Reținînd această observație, să uităm pentru un timp detaliile de structură ale universului și să considerăm galaxiile aflate la o mare depărtare unele de altele numai ca niște repere, comode pentru măsurarea distanțelor. Dacă avem de-a face cu un spațiu euclidian, putem să ne închipuim direct dilatarea lui, care în cazul unui model cu două dimensiuni seamănă cu întinderea unei pelicule de cauciuc care este trasă uniform în toate părțile. Ne dăm seama ușor că viteza de depărtare a oricăror două puncte de pe peliculă (de pildă a punctelor A și B sau a punctelor A și C din fig. 7) este proporțională cu distanța dintre puncte. Așadar, $V_{AB} = HR_{AB}$ și $V_{AC} = HR_{AC}$ (în această notație, de pildă, V_{AB} este viteza de depărtare a punctelor A și B, adică modificarea în decursul unei unități de timp a distanței R_{AB} dintre aceste puncte). Dilatarea unei sfere tridimensionale este analogă dilatării sferelor bidimensionale cu care ne întîlnim în viață, de pildă a unei bășici de săpun sau a unei camere de cauciuc umflate cu pompa. Dacă ne limităm la o porțiune mică a unei asemenea pelicule sferice, ea se deosebește

Fig. 8. Suprafața unei camere de cauciuc umflate cu pompa, model bidimensional al unei sfere tridimensionale în dilatare.



prea puțin de o peliculă plană și putem considera că și în acest caz $V_{AB} = HR_{AB}$ (fig. 8).

Cel mai simplu model fridmanian (adesea denumit *modelul Einstein-de Sitter*, deoarece aceștia l-au folosit în 1932, în timp ce Fridman însuși, după cum se pare, nu a examinat acest caz), se prezintă astfel: spațiul este euclidian și se dilată, adică distanța dintre repere (galaxii) crește neîncetat. În modelul Einstein-de Sitter, dependența acestei distanțe R de timpul t este deosebit de simplă (fig. 9), avînd aspectul $R \approx A\sqrt[3]{t^2}$, unde A este o constantă. Pentru a compara distanțele suficient de mici dintre „repere”, vom considera că viteza de variație a distanței R , pe care o vom însemna cu v , este proporțională cu însăși distanța R , adică $v = HR$. Din motive care vor

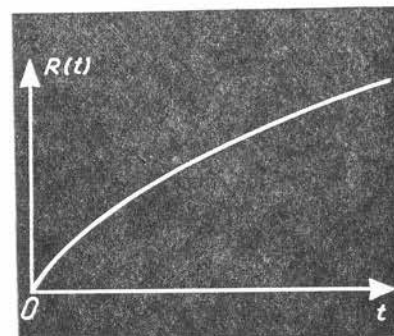


Fig. 9. Dilatarea (modificarea distanțelor) în modelul Einstein-de Sitter.

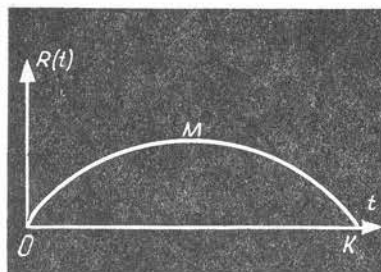


Fig. 10. Modificarea în timp a razei de curbura și a distanțelor în modelul fridmanian cu curbura pozitivă (sferă tri-dimensională).

reieși mai departe, mărimea H , care figurează în această formulă, se numește *constantă lui Hubble*. Această mărime trebuie să fie într-adevăr identică în tot spațiul, dar ea se schimbă în timp, și anume în modelul examinat H scade cu timpul sau crește proporțional cu $1/t$. Densitatea medie a substanței în modelul Einstein-de Sitter, H fiind dat, are o valoare bine determinată, egală cu $\rho_h = \frac{3H^2}{8\pi G}$.

Ce se întâmplă însă dacă densitatea ρ nu este egaiă cu ρ_h ?

Dacă ρ este mai mare decât ρ_h , în cadrul modelelor fridmaniene va fi vorba de un spațiu neeuclidian, și anume de un spațiu sferic cu o rază de curbura variabilă. Dependența acestei raze și a altor distanțe de timpul t reiese clar din figura 10; lumea mai întâi se dilată, apoi se contractă din nou.

Dacă însă densitatea ρ este mai mică decât ρ_h , dilatarea se produce nelimitat, dar ceva mai repede decât în cazul $\rho = \rho_h$ (vezi fig. 9 și 11). Geometria modelului este o geometrie neeuclidiană, spațiul avînd o curbura constantă negativă (analogul bidimensional al unui asemenea spațiu este suprafața unui hiperboloid).

Acestea sînt cele trei modele fridmaniene ale universului. Ele „încep” toate de la un punct, respectiv de la valoarea nulă a lui R . Vom numi acest punct „origine”¹. Este clar că densitatea substanței la „origine” este infinită și, în general, lucrurile se prezintă în așa fel ca și cum în momentul $t = 0$ ar fi avut loc „facerea lumii”. În realitate, regiunea din vecinătă-

¹ În originalul rus, *nacealo*, cuvînt care înseamnă și „origine”, și „început” (N. T.).

tea „originii” trebuie discutată, bineînțeles, în mod special, ceea ce vom și face mai jos. Pentru moment este suficient să privim punctul $R = 0$, $t = 0$ ca o „origine” convențională: așa ar fi dacă am putea să considerăm modelul ca valabil în trecut literalmente pînă la momentul $t = 0$.

Astăzi, universul se află, evident, departe de „origine” și în primul rînd ne va interesa trecutul lui relativ recent, să zicem de „numai” cîteva miliarde de ani. Despre un trecut mai îndepărtat vom vorbi în mod special în altă parte.

Am deservit modelele fridmaniene și am spus că ele reprezintă soluția ecuațiilor teoriei relativității generalizate pentru o lume omogenă nestaționară. Dar nu putem să ne mulțumim cu atît. Fără să vrem, apare întrebarea: de ce este nestaționar modelul? care să fie cauza fizică a acestui fapt?

Este foarte curios că de-abia în 1934 oamenii de știință englezi Milne și McCrea au arătat că principala trăsătură distinctivă a modelelor lui Fridman (caracterul lor nestaționar) nu este deloc legată de particularitățile teoriei relativității generalizate, ci are o explicație foarte simplă, perfect inteligibilă chiar în cadrul mecanicii newtoniene.

Într-adevăr, să ne închipuim o sferă uriașă, alcătuită din particule separate, care practic nu se întîlnesc între ele, ci numai se atrag potrivit legii gravitației universale. Rolul „particulelor” poate fi foarte bine asimilat cu acela al stelelor. Dacă vom presupune, în plus, că în momentul originar toate aceste stele s-au aflat în stare de repaus, va rezulta că sub influența atracției reciproce sfera stelară se va contracta și raza ei se va reduce, exact așa cum se modifică raza R în figura 10 între punctele M și K .

Dacă însă ne vom închipui că toate stelele (particulele) au ocupat la „început” un volum foarte mic și apoi li s-a imprimat o mare viteză inițială în direcția razei în creștere a sferei, această rază se va modifica exact așa cum se vede în figurile 9, 10 sau 11, începînd cu punctul H .

Care dintre aceste trei cazuri va avea loc, depinde de mărimea vitezei inițiale. Dacă această viteză nu este suficient de mare pentru a depărta stelele la infinit, după cîtăva vreme va avea loc o oprire, urmată apoi de contractare (vezi fig. 10). Mișcarea descrisă în figura 9 corespunde unei asemenea viteze inițiale încît, în urma unei dilatări infinite, viteza

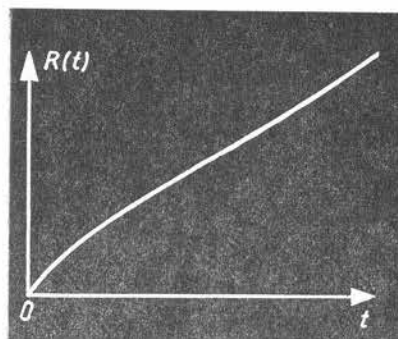


Fig. 11. Modificarea în timp a razei de curbura și a distanțelor în modelul fridmanian cu curbura negativă.

stelilor devine egală cu 0. Dacă însă viteza inițială este și mai mare, dilatarea se desfășoară mai rapid, iar raza crește așa cum se vede în figura 11. După cum s-a constatat, teoria newtoniană descrie nu numai calitativ, ci și cantitativ procesul dilatării modelelor fridmaniene. Acest rezultat nu este întâmplător.

Într-adevăr, se știe că teoria relativității generalizate nu a „desființat” teoria newtoniană a gravitației, ci, privind lucrurile dintr-o perspectivă mai largă, mai generală, continuă să o conțină sub formă de caz limită, respectiv cazul unor câmpuri gravitaționale slabe. Coincidența cantitativă dintre calculele clasice și cele relativiste pentru modelele lui Fridman este legată de caracterul omogen și izotrop al spațiului în aceste modele.

În felul acesta, caracterul nestaționar al modelelor universului în care acționează numai forțele gravitației este lesne de înțeles, fiind determinat de faptul că pentru echilibru (stare staționară) este nevoie de două tipuri de forțe: atracție și respingere. Așa se și întâmplă, de pildă, în cazul unei camere de cauciuc umflate: presiunea aerului tinde să o lărgească, în timp ce forțele elastice ale peliculei de cauciuc acționează în direcția contrară.

Se poate pune întrebarea: de ce un lucru atât de simplu nu s-a observat mai demult? Pentru a răspunde trebuie să ne gândim la caracterul infinit al modelelor clasice. Nu întâmplător, mai sus am considerat sfera stelară ca fiind finită și am vorbit despre raza ei. De fapt, în teoria newtoniană se poate trece

și la un sistem finit, iar în acest caz rezultatul nu se schimbă, dar o asemenea trecere reclamă o analiză specială, trecerea la limită de la un sistem finit la unul infinit. Teoria relativității generalizate a depășit în această privință teoria newtoniană tocmai pentru că în cadrul teoriei relativității generalizate este mai ușor să se considere sisteme infinite, iar afară de aceasta există și modele sferice cu volum finit.

Să facem un bilanț al căii lungi și anevoioase pe care a străbătut-o cosmologia.

Forțele gravitaționale corespund atracției și de aceea nu pot exista nici modele finite, nici modele infinite ale universului, dacă îl presupunem izotrop, omogen și staționar; în funcție de „condițiile originare”, substanța din aceste modele se va dilata sau se va contracta. Această concluzie poate fi trasă chiar în cadrul teoriei newtoniene, iar teoria relativității generalizate nu o modifică. Ceea ce a introdus nou teoria relativității generalizate este caracterul neeuclidian al spațiului, curbura lui.

În consecință, s-a constatat că unui model newtonian cu o viteză mică de recesiune, pentru care densitatea ρ este mai mare¹ decât $\rho_k = \frac{3H^2}{8\pi G}$, îi corespunde o lume sferică (închisă) tridimensională cu raza variind în timp, așa cum se arată în figura 10. În cazul $\rho = \rho_k$, lumea euclidiană și modelul newtonian coincid perfect cu modelul fridmanian. În sfârșit, în cazul unei densități mici (când ρ este mai mic decât ρ_k), spațiul este neeuclidian, dar volumul lui este infinit și extinderea nelimitată.

Deplasarea cosmologică spre roșu a liniilor spectrale

Observațiile astronomice au arătat că în epoca noastră universul se dilată. Aceasta înseamnă că galaxiile depărtate se îndepărtează tot mai mult de noi. Cu cât galaxiile se află mai departe, cu atât distanța crește mai repede. Rezultatul acesta a fost stabilit definitiv în 1929.

¹ Cu cât este mai mare densitatea, cu atât cresc forțele de atracție. În același timp, valoarea ρ_k este într-un anumit sens măsura vitezei de dilatare, întrucât $v = HR$, iar densitatea ρ_k este proporțională cu H^2 .

Se pune întrebarea: care este criteriul potrivit căruia am putea face o alegere între diferitele modele cosmologice? Și, în general, au oare modelele considerate vreo legătură cu realitatea? La aceste întrebări se poate da un răspuns numai pe baza observației. Concret, trebuie să vedem dacă galaxiile depărtate se îndepărtează într-adevăr de noi și după ce lege. Noroc că, în principiu, putem măsura relativ ușor viteza de deplasare a stelelor și a galaxiilor cu ajutorul efectului Doppler, adică urmărind schimbarea lungimii de undă a liniilor spectrale.

Pentru a explica efectul Doppler se recurge, de obicei, la exemplul schimbării tonului sirenei de locomotivă când locomotiva trece prin fața unui observator. Când locomotiva se apropie, înălțimea (frecvența) sunetului crește, iar atunci când locomotiva se îndepărtează, înălțimea sunetului scade. Vom adăuga că efectul Doppler are loc în cazul oricăror unde, fiind de natură cinematică, ceea ce se poate vedea din figura 12 și din legenda respectivă. În cazul vitezelor mici, este

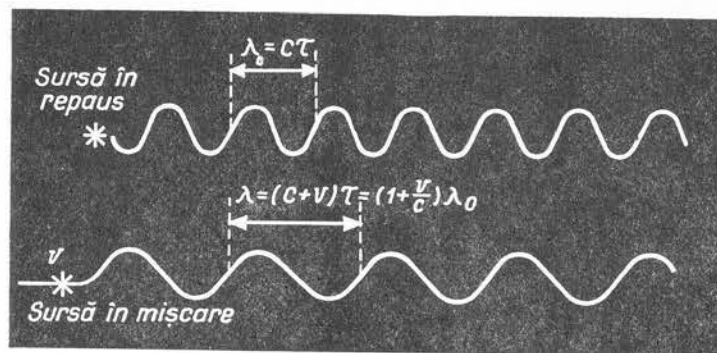


Fig. 12. Efectul Doppler. Să admitem că sursa de radiați oscilează cu o perioadă T_0 , deci frecvența $\nu_0 = \frac{1}{T_0}$. Dacă sursa de radiați este imobilă în raport cu observatorul, în perioada T_0 lumina va străbate o distanță $\lambda_0 = cT_0$; aceasta va fi lungimea unei recepționate. Dacă însă sursa de radiați se depărtează de observator cu viteza V , lumina va parcurge în perioada de oscilație distanța $\lambda = (c + V) T_0 = \left(1 + \frac{V}{c}\right) \lambda_0$. Radiația recepționată va avea în cazul al doilea tocmai lungimea λ , iar $\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = V/c$.

valabilă formula $\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = V/c$ (unde λ este lungimea unei de lumină emise de o sursă ce se depărtează de observator cu viteza V ; λ_0 este lungimea de undă corespunzătoare aceleiași linii spectrale în cazul unei surse în repaus). Dacă viteza V are valori mari, apropiate de viteza luminii c , relația dintre λ și λ_0 este ceva mai complicată (de pildă, în cadrul teoriei relativității restrinse, în cazul depărțării sursei

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{1 + \frac{V}{c}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} - 1).$$

Pentru noi este esențial faptul că, măsurând lungimea de undă λ sau parametrul $z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$ folosit de obicei, putem de-

termina viteza de depărțare V a galaxiei (dacă galaxia s-ar apropia, z și-ar schimba semnul, deoarece în acest caz λ ar fi mai mic decât λ_0). Creșterea lungimii de undă corespunde deplasării liniilor spectrale spre capătul roșu al spectrului, din care cauză se vorbește despre deplasarea spre roșu a liniilor spectrale, în timp ce micșorarea lungimii de undă duce la deplasarea liniilor spectrale spre violet.

Este clar că, dacă universul se dilată, vom observa în cazul galaxiilor depărtate deplasarea spre roșu a liniilor spectrale, și anume o deplasare cu atât mai mare cu cât o galaxie este mai depărtată. Riguros vorbind, acest efect a fost observat de astronomul american Slipher încă înainte de apariția lucrării lui Einstein din 1917. Aceste observații erau puțin cunoscute și mai ales puțin convingătoare. Cauza este faptul că pe atunci mijloacele de determinare a distanțelor pînă la galaxii erau foarte slabe. De aceea, în mod practic se determina doar deplasarea liniilor spectrale, care pentru galaxiile apropiate avea loc adesea spre violet. Fenomenul se explică prin faptul că, în afară de participarea la extinderea generală a universului, galaxiile au și o anumită viteză haotică, care de obicei nu depășește 1 000 km/s (dacă $V = 10^8$ cm/s, $z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{V}{c} = 0,003$; o asemenea deplasare a liniilor poate fi destul de ușor măsurată).

Desigur, ca urmare a mișcării haotice apar deplasări în spectru ($\lambda - \lambda_0$) în ambele sensuri. Fenomenul dilatării generale se manifestă în faptul că deplasările spre roșu se întâlnesc mai des decât cele spre violet. La aceasta trebuie să adăugăm observația că galaxiile mai depărtate sînt, bineînțeles, mai puțin strălucitoare, din care cauză studierea spectrului lor este mai dificilă.

De aceea nu trebuie să ne mire faptul că nu numai Einstein în 1917, dar nici Fridman în 1922 și 1924, după cîte știm, nu aveau cunoștință de deplasarea liniilor spectrale în spectrele galaxiilor.

De-abia în 1929, E. Hubble, care pe atunci lucra cu cel mai mare telescop din acea vreme la Observatorul de pe Mount Wilson (cu diametrul oglinzii de 2,5 m), a demonstrat definitiv că galaxiile se îndepărtează de noi, iar viteza de recesiune crește cu distanța de la Pămînt, potrivit relației $v = HR$, relație care a primit denumirea de legea lui Hubble. Cît de dificilă era pe atunci măsurarea distanței R ne putem da seama din faptul că Hubble și-a calculat coeficientul H (constanta lui Hubble) foarte inexact: el a atribuit în mod eronat distanțelor valori aproape de 5 ori mai mici decât cele reale și în felul acesta a exagerat de tot atîtea ori valoarea lui H . Potrivit datelor de care dispunem astăzi, care nici ele nu sînt foarte precise și sigure, $H_{actual} = 3 \cdot 10^{-18} s^{-1}$. Mărima inversă $t_{actual} = \frac{1}{H_{actual}} \approx 3 \cdot 10^{17} s = 10^{10} ani^1$.

După cum am văzut mai sus, în modelele fridmaniene legea lui Hubble trebuie să se confirme pentru galaxiile nu prea depărtate (pentru care parametrul $z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$ este simțitor mai mic decât unitatea). Așadar, se poate spune că Hubble a demon-

¹ După cum am arătat, potrivit datelor eronate ale lui Hubble, valoarea lui t_{actual} este egală cu circa $2 \cdot 10^9$ ani. De aici urma că în modelele fridmaniene vîrsta universului (timpul scurs de la „origine”) e mai mică decât vîrsta Pămîntului, care este egală cu cîteva miliarde de ani. Acest rezultat, bineînțeles absurd, era considerat ca un argument împotriva modelelor fridmaniene. Astăzi este clar că aceste îndoieli erau cu totul nejustificate și se explicau prin imperfecția măsurării distanțelor pînă la galaxiile depărtate (mai exact, eroarea a pornit de la determinarea distanțelor pînă la galaxiile apropiate; aceste distanțe au servit apoi la determinarea distanței pînă la galaxiile îndepărtate).

strat dilatarea universului și caracterul plauzibil al cosmologiei fridmaniene cel, puțin pentru trecutul accesibil observației. Aceasta a constituit o descoperire atît de fundamentală, în cît unii nu au acceptat-o și mulți au acceptat-o abia după mult timp. S-a încercat să se explice deplasarea spre roșu prin alte cauze decât efectul Doppler. Ce s-ar întîmpla, de pildă, dacă lumina în timpul călătoriei ei prin imensitatea universului își schimbă frecvența? Se vorbește adesea despre acest proces ipotetic bazat pe „îmbătrînirea” fotonilor, particule din care, potrivit teoriei cuantelor, este formată lumina. O asemenea eventualitate a fost amănunțit analizată, ajungîndu-se la concluzia că nici un efect cunoscut în fizică, în afară de efectul Doppler, nu poate să ducă la deplasarea observată a liniilor spectrale.

Totodată, interpretarea deplasării liniilor spectrale ca o urmare a efectului Doppler își găsește noi și noi confirmări. În cazul efectului Doppler, parametrul $z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$ nu depinde de lungimea de undă și trebuie să aibă o valoare universală. Acest fapt se observă, într-adevăr, pentru o gamă largă de unde, de la undele radio pînă la partea violetă a spectrului.

Un atac mai rafinat împotriva cosmologiei nestaționare s-a dezlănțuit în 1948. Să presupunem că galaxiile se îndepărtează într-adevăr. Înseamnă oare aceasta că numărul lor într-un volum dat scade sau, cu alte cuvinte, că densitatea substanței în univers descrește cu timpul?

S-ar părea că o asemenea concluzie este inevitabilă. Totuși, nu este așa dacă în locul substanței care evadează dintr-un volum dat din pricina dilatării „se naște” tot timpul o substanță nouă. Dar cum „se naște” ea, în ce fel? Iată tot atîtea întrebări legitime. Imposibilitatea de a răspunde la ele nu suprimă însă ipoteza în sine. Fapt este că ea a fost formulată (de F. Hoyle, Australia, N.T.) și susținută pînă în prezent ca una dintre eventualitățile cosmologice posibile. S-a presupus totodată că substanța „se naște” exact în cantitatea necesară pentru ca universul, în pofida dilatării, să rămînă staționar și densitatea medie să nu varieze în timp.

Autorul prezentei lucrări, ca și majoritatea altor fizicieni și astronomi, a avut întotdeauna o atitudine categoric negativă față de modelul cosmologic staționar, care implică „nașterea”

permanentă a substanței. Dar asemenea probleme nu se rezolvă prin punere la vot și în funcție de gusturi sau chiar de considerații solid argumentate cu caracter teoretic. Într-adevăr, și în modelele fridmaniene avem de-a face cu o „singularitate” puternic marcată în trecut, la „început” (respectiv la originea coordonatelor în fig. 9, 10 și 11): acolo densitatea substanței este infinită. Lucrurile se petrec ca și cum tot universul s-ar „naște” în momentul $t = 0$. Pe de altă parte, cantitatea de substanță care trebuie să se nască în cazul cosmologiei staționare este infimă, apreciind după etaloanele terestre. Ar trebui să apară în total vreo trei atomi pe an într-un cub cu muchia de 1 km. Într-un asemenea volum, la presiunea atmosferică ar exista aproximativ $3 \cdot 10^{34}$ molecule de aer. Firește, nu putem observa în laborator apariția citorva atomi în plus pe lângă miliardele de atomi existenți sau, vorbind mai precis, pe baza observațiilor existente nu putem contesta posibilitatea apariției lor. În sfârșit, la obiecția că nu poate să apară substanță nouă „din nimic”, adepții cosmologiei staționare răspund că în modelul lor substanța este generată de un „cîmp nou” oarecare, că este vorba de transformarea unei forme a materiei (necunoscută nouă) într-o altă formă, pe care o cunoaștem.

Este drept că asemenea argumente amintesc foarte mult divagațiile despre „energia-mediumatică” ale unor personaje din comedia *Roadele învățturii*, în care L. Tolstoi satiriza pseudoștiința. Cu toate acestea, trebuie să revenim la concluzia universal-valabilă pentru întreaga știință: arbitru autentic și implacabil care decide destinele noilor ipoteze este experiența, observația. În ceea ce privește destinul cosmologiei staționare, care admite „nașterea” substanței, problema poate fi rezolvată în principiu foarte simplu. În acest model, densitatea medie a substanței este invariabilă în timp, pe cînd în modelele fridmaniene și în alte modele analoge care admit dilatarea, densitatea a fost în trecut mai mare decît în epoca noastră. Aceasta se referă, între altele, și la numărul galaxiilor: densitatea lor trebuie să fi fost mai mare în trecut.

Din păcate, nu știm deocamdată să măsurăm densitatea întregii substanțe din univers, iar numărătoarea galaxiilor în funcție de distanța lor față de Pămînt este de asemenea dificilă din cauza greutății de a măsura distanțele și a existenței

unor galaxii cu proprietăți cît se poate de diferite, între altele cu o luminozitate diferită.

Anticipînd unele concluzii care se expun în această lucrare, putem afirma că, în ciuda tuturor greutăților, astăzi se poate totuși considera ca fiind demonstrat (sau în orice caz aproape demonstrat) că în trecut numărul galaxiilor a fost mai mare decît astăzi și că, în afară de aceasta, proprietățile medii ale galaxiilor se modifică în timp (în trecut au fost cu mult mai multe obiecte cosmice cu strălucire mare). Împotriva cosmologiei staționare pledează de asemenea radiația termică remanentă descoperită în 1965, despre care vom vorbi mai tirziu. În consecință, modelul cosmologic staționar poate fi considerat respins sau, vorbind foarte riguros, aproape respins. Dar istoria apariției acestui model, dificultățile infirmării lui, în pofida caracterului lui neobișnuit, sînt foarte instructive și caracteristice pentru dezvoltarea cosmologiei și de aceea merită să fie cunoscute.

Radiogalaxiile și quasarii, martori ai trecutului îndepărtat

La radiogalaxiile și obiectele evisistolare recent descoperite — quasarii — au fost constatate viteze de recesiune deosebit de mari.

Locuitorii Pămîntului sferic nu au nevoie de explicații prea amănunțite pentru a înțelege că o porțiune mică a suprafeței planetei noastre nu poate fi deosebită de o porțiune plană. În mod similar nu se poate face distincție între diversele modele fridmaniene numai pe baza legii lui Hubble, $v = HR$, valabilă pentru toate modelele. Lucrul acesta este lesne de înțeles, deoarece legea lui Hubble este valabilă numai pentru vitezele v mici în comparație cu viteza luminii c sau — ceea ce este același lucru — pentru deplasările spre roșu cu valori mici ale parametrului $z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$. Hubble a stabilit de altfel

legea pe baza unui material de cercetare în care valoarea maximă a lui z nu depășea 0,1. Viteza corespunzătoare $v \approx \approx 0,1 \cdot c = 3 \cdot 10^9$ cm/s este enormă, iar galaxia emițătoare se află la o distanță de un miliard de ani-lumină, și totuși aceste mărimi sînt insuficiente pentru determinarea curburii spațiului.

Este evident că trebuie studiate spectrele unor galaxii și mai îndepărtate, dar acest studiu nu poate fi decît cu greu

realizat chiar dacă se folosește cel mai mare telescop existent astăzi — telescopul de pe Mount Palomar, cu diametrul oglinzii de 5 m (acest telescop a intrat în funcțiune în 1948).

Dificultatea principală constă în faptul că numărul spectrogramelor ce se pot realiza într-un timp limitat este de ordinul sutelor sau al miilor, pe când acela al galaxiilor cu valorile parametrului z mai mici, de pildă, decât 0,5 este de câteva miliarde. Prin urmare, alegând la întâmplare galaxiile pentru cercetare, avem prea puține șanse să obținem un rezultat interesant. De aceea am putut să explorăm epoci mai îndepărtate numai când a apărut un criteriu pentru alegerea obiectelor „interesante” pentru cercetare. Un asemenea criteriu este existența unei puternice emisiuni de unde radio. Luminozitatea (puterea emisiunii) galaxiilor în domeniul optic al spectrului nu este egală, dar pentru galaxiile mari, chiar de tipuri diferite (spirale, eliptice), ea nu prezintă deosebiri prea mari.

Altfel stau lucrurile cu emisiunea de unde radio. S-au descoperit galaxii cu emisiuni deosebit de puternice în spectrul radio, denumite din această cauză *radiogalaxii*, de pildă radiogalaxia Lebăda A emite în unde radio aproximativ $5 \cdot 10^{44}$ erg/s, ceea ce depășește de 5 ori luminozitatea ei optică. Pentru comparație, vom spune că Galaxia noastră, care nu face parte dintre radiogalaxii, emite în domeniul radio numai $3 \cdot 10^{38}$ erg/s, respectiv de câteva milioane de ori mai puțin decât Lebăda A. Cât despre lumină, Galaxia noastră emite aproximativ $5 \cdot 10^{43}$ erg/s, adică numai de vreo două ori mai puțin decât Lebăda A. Nu este de mirare că pe „firmamentul radio” Lebăda A, care se află la o distanță de 600 milioane de ani-lumină, „strălucește” mai puternic decât majoritatea radiosurselor, incomparabil mai apropiate.

De fapt numai galaxiile eliptice strălucitoare sînt radiogalaxii. Pînă în prezent, radiotelescoapele au detectat pe cer ceva mai puțin de 10 000 de radiosurse, dintre care numai câteva sute au fost cercetate mai amănunțit. Din cele spuse reiese clar că primii candidați pentru studierea spectrului lor trebuie să fie radiosursele. Tocmai o asemenea abordare a problemei a dus la succes.

În 1960 s-a determinat deplasarea spre roșu în spectrul radiogalaxiei 3C 295 (obiectul nr. 295 din *Catalogul nr. 3 al surselor radio* întocmit de observatorul de la Cambridge). S-a constatat că în acest caz $z = 0,46$, ceea ce înseamnă că obiectul se îndepărtează cu o viteză egală cu aproape jumătate din viteza luminii și se află la o distanță de aproximativ 5 miliarde de ani-lumină de noi. Dintre radiogalaxii, nici una nu a depășit pînă acum această cifră record. Cu timpul au fost însă descoperite radiosurse de un tip întrucîtva diferit — quasarii.

În unele locuri în care catalogul 3 C indică prezența unor surse nu s-au observat galaxii, ci mici stelute, cel puțin ca aspect exterior. Astăzi, aceste „stelute” sînt denumite *obiecte cuasistelare*, *surse cuasistelare* sau *quasari*. S-a calculat că pînă și quasarii cei mai apropiați de noi au un z de ordinul 0,1, iar pentru cel mai strălucitor dintre quasarii apropiați, 3 C 273-B, parametrul $z = 0,16$ (tocmai la acest quasar s-a evaluat pentru prima dată, în 1963, deplasarea spre roșu).

În spectrul radio, quasarii nu sînt mai strălucitori, ci de obicei chiar ceva mai slabi decât radiogalaxiile puternice. În schimb, în spectrul optic, luminozitatea quasarelor este deosebit de puternică: sînt cele mai strălucitoare surse de lumină din univers. De exemplu, quasarul 3 C 273-B emite cam de 100 de ori mai multă lumină vizibilă decât Galaxia noastră. De aici rezultă că astăzi quasarii reprezintă pentru noi cei mai buni martori cunoscuți ai trecutului îndepărtat. Într-adevăr, în 1965 s-a dovedit că pentru quasarul 3 C 9 parametrul deplasării spre roșu $z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = 2$. Aceasta înseamnă că lungimea

de undă recepționată este de trei ori mai mare decât lungimea de undă emisă.

Studierea unor surse cu o atît de mare deplasare spre roșu, în afară de alte avantaje, deschide posibilitatea observării unor linii spectrale deosebit de importante, care în condiții normale nu au putut fi niciodată fotografiate pe suprafața Pămîntului din cauza puterii de absorbție a atmosferei terestre. Cel mai pregnant exemplu este cunoscuta linie a hidrogenului, denumită *linia Lyman-alfa* (trecerea de la nivelul al doilea la primul nivel al atomului de hidrogen). Lungimea de undă a acestei linii este de 1 216 de angströmi = $1,216 \cdot 10^{-5}$ cm, ea fiind puternic absorbită chiar de un strat subțire de aer. Dar

pentru $z = 2$ avem $\lambda = 3\lambda_0 = 3\,648$ de angströmi, și radiația ajunge lesne la suprafața Pământului; într-adevăr, ea a putut fi observată. Acest fapt este foarte semnificativ. El permite să evaluăm cantitatea de hidrogen neionizat din vecinătatea quasarului 3C9 (după cum s-a constatat, această cantitate este foarte mică).

Până acum s-au obținut spectrele a aproximativ 100 de quasari. Valoarea maximă a lui z găsită este de 2,88. Depărtarea până la asemenea quasari, dacă folosim modelul Fridman simplu, este de aproximativ 8 miliarde de ani-lumină.

Nu putem trece sub tăcere faptul că problema naturii quasrilor încă nu a fost definitiv rezolvată; unii astronomi au pus la îndoială însăși justetea interpretării date deplasării spre roșu în cazul quasrilor ca fiind datorată unui fenomen cosmologic (determinată de dilatarea universului). Îndoielile își au sursa în faptul că pentru galaxii (inclusiv radiogalaxii), în afară de măsurarea deplasării spre roșu, se evaluează oarecum independent depărtarea lor (de pildă, după mărimea unghiulară a galaxiei); în cazul quasrilor, nu cunoaștem decât deplasarea spre roșu. De aceea s-a creat un teren pentru ipoteze extravagante, cum ar fi presupunerea că din nucleul Galaxiei noastre sau al unor radiogalaxii apropiate (adică din zona densă din centrul galaxiei respective) țîșnește gaz sub formă de plasmă.

Dacă nu ne călăuzim după teza, evident falsă, că „în astronomie totul este posibil“, trebuie să admitem că nu au existat niciodată argumente serioase în favoarea ipotezei menționate sau a altora asemănătoare. Există însă în prezent argumente destul de convingătoare, deși încă nu definitive, în favoarea tezei că, într-adevăr, quasarii se află departe și sînt niște stele instabile, uriașe (mai curînd s-ar putea spune suprastele), înconjurate de o anvelopă de gaz rarefiat. Mai exact, potrivit unui asemenea model, partea centrală a quasarului (nucleul) este o aglomerare aproape sferică de gaz, cu o masă care poate depăși de sute de milioane de ori masa Soarelui. Dacă această aglomerare de gaz nu s-ar roti și ar fi lipsită de mișcări interne și de cîmp magnetic, ea s-ar contracta cu repeziciune (s-ar ajunge la o prăbușire a substanței spre centru) sub influența forțelor gravitației. Datorită rotației, mișcărilor interne și cîmpurilor magnetice, norul gazos (quasarul) se află într-o stare apropiată de stabilitate, avînd loc doar o contractare

lentă. În cursul acestei contracții, energia gravitațională a norului scade, iar energia care rezultă în felul acesta este emisă de quasar printr-o serie de procese. Ce-i drept, există și o altă ipoteză, potrivit căreia quasarii sînt niște asociații dense de stele. Ca urmare a contracției unei asemenea asociații și, poate, a ciocnirilor dintre stelele care o formează, asociația emite o mare cantitate de lumină.

Unul dintre argumentele deosebit de importante care pledează în favoarea naturii cosmologice a quasrilor (adică a interpretării cosmologice a deplasării spre roșu în spectrele lor) constă în următoarele: nucleele unei serii de galaxii (în special ale galaxiilor de un anumit tip, numite galaxii Seyfert) se comportă întru totul asemănător cu quasarii: emit o cantitate foarte mare de lumină și de unde radio, își modifică relativ repede strălucirea etc. Dar în acest caz distanța până la surse este cu siguranță foarte mare, iar aceste surse nu au fost ejectate de nicăieri. Cu alte cuvinte, quasarii sînt asemănători nucleelor galaxiilor și este firesc să le considerăm obiecte analoge acestor nuclee, respectiv să explicăm deplasarea spre roșu din spectrele lor prin participarea la expansiunea generală a universului. Afară de aceasta, în 1969 s-a constatat că unii quasari se află în asociații de galaxii îndepărtate și, prin urmare, se găsesc și ei departe (la distanțe cosmologice). Probabil că într-un viitor apropiat problemele depărtării și mai ales a naturii quasrilor vor fi definitiv rezolvate.

Deocamdată, analiza quasrilor a și dus, între altele, la un interesant mod de a pune problema. Observațiile arată, în primul rînd, că majoritatea quasrilor au parametrul z apropiat de 2. S-ar părea, dacă ținem seama numai de luminozitate, că ar putea fi observați și quasari cu valoarea lui z mai mare decât 2, ajungînd pînă la 4 și 5, dar datele observației nu semnalează asemenea quasari. În schimb, quasarii cu z mai mare de 1,9, par să fie în număr destul de mare (circa 15 din primii o sută de quasari cercetați). Dar acestea sînt deocamdată „primele rîndunele“. Poate că vom da și de „păsări“ mai mari. Avem în vedere faptul că în spectrul unor quasari cu valori mari ale lui z s-au găsit linii de absorbție corespunzînd valorii $z = 1,95$. Liniile de absorbție se obțin atunci cînd lumina trece printr-un gaz absorbant. Așadar, dacă este adevărat că mulți quasari au linii de absorbție prezentînd un $z = 1,95$, afirmație

care se cere încă verificată, aceasta ar însemna că în univers, în epoca ce corespunde valorii $z = 1,95$, a existat o aglomerare de gaze. Acest rezultat pare, la prima vedere, foarte bizar și este folosit ca argument împotriva naturii cosmologice a quasarilor, împotriva ipotezei că ei se află la distanțe foarte mari de noi.

În ultimul timp, această problemă atrage atenția astronomilor. Unii continuă să insiste asupra unui pretins caracter aparte al valorii $z = 1,95$ în ceea ce privește liniile de absorbție. Alții demonstrează că există linii de absorbție și pentru alte valori ale lui z , și că valoarea $z = 1,95$ nu are nimic deosebit. În acest din urmă caz nu este nevoie de nici o explicație; dacă însă valoarea $z = 1,95$ are o semnificație deosebită, o explicație se impune. Vom mai reveni la această problemă, dar pînă atunci să facem un bilanț.

În ultimul deceniu, oamenii de știință au izbutit — folosind drept „feinare“ radiogalaxiile și quasarii — să pătrundă cu privirea cu mult mai departe „în adîncul vremurilor“. Astăzi se observă deplasări spre roșu pentru care lungimea de undă crește mai mult decît de trei ori. Recesiunea galaxiilor depărtate și a quasariilor este în afară de orice îndoială. De asemenea, a fost destul de convingător demonstrat caracterul nestaționar al universului: modificarea în timp a caracteristicilor lui medii (de pildă a densității medii).

În modelele de univers în expansiune nu întîlnim dificultăți de tipul paradoxului Olbers sau al concluziei cu privire la „moartea termică“ a universului. O problemă care s-a pus încă de mult (practic în 1929, după ce s-a constatat cu certitudine dilatarea universului) constă în alegerea tipului de model nestaționar și, în particular, în determinarea curburi spațiului. Atita timp cît s-au observat numai deplasări spre roșu relativ mici, era deosebit de greu să se răspundă la această întrebare. În prezent, situația s-a schimbat și alegerea modelului a devenit o problemă absolut reală, care figurează pe ordinea de zi. Probabil că într-o anumită măsură ea va fi rezolvată în anii următori.

Termenul Λ și modelul cosmologic al lui Lemaître

Particularitățile descoperite în spectrul quasariilor au permis să se pună problema verificării modelului cosmologic al lui Lemaître. Potrivit acestui model, într-o anumită etapă, ritmul dilatării universului s-a încetinit atît de mult, încît el s-a oprit parca aproape în nemișcare.

Observațiile arată că galaxiile sînt, în medie, distribuite în spațiu independent de direcție. Tocmai de aici se trage concluzia că universul poate fi considerat în limitele vizibilității ca omogen și izotrop. Faptul acesta justifică de asemenea confruntarea observațiilor cu modelele unui univers omogen în expansiune. Dar putem oare să ne limităm la cele trei modele fridmaniene sau este util să luăm în considerare și modele mai generale, în care termenul Λ nu este diferit de 0? Această problemă este discutată sau cel puțin menționată de mulți ani în majoritatea lucrărilor de cosmologie.

După ce s-a lămurit că universul se dilată, însuși Einstein s-a pronunțat — și poate chiar mai categoric decît alții — împotriva introducerii termenului Λ . Dar, după cum spune un cunoscut proverb oriental, este mult mai ușor să-i dai drumul unui duh închis într-o sticlă decît să-l silești să intre înapoi. Introducerea termenului Λ este evident admisibilă, iar argumentul că ne putem lipsi de el nu este cîtuși de puțin convingător pentru toată lumea. Soluția de mijloc, așa-zisa „soluție de aur“, se reducea pînă nu de mult la următoarele: introducerea termenului Λ este admisibilă, dar nu este prea firească și, ceea ce este important, în condițiile unei lipse de date observabile, trebuie să începem confruntarea teoriei cu observația fără să facem uz de noua constantă necunoscută Λ . Dacă însă o asemenea confruntare va întîmpina dificultăți, vom putea să ne gîndim serios și la termenul Λ . Numai cu trei ani în urmă, o asemenea posibilitate părea cu totul învăluită în ceață, dar deodată negura a început să se împrăstie.

În martie 1967, în „Astrophysical Review“ din S.U.A., W. Petrosian, E. Salpeter și P. Szekers au publicat un articol în care atrăgeau atenția asupra faptului că particularitățile menționate ale spectrului quasariilor pot fi explicate în mod firesc în cadrul unuia dintre modelele cosmologice cu termenul Λ . Acest model, propus în 1931 de astronomul belgian G. Lemaître, este un caz particular al modelelor fridmaniene generale cu termenul Λ .

Dacă introducem în ecuațiile gravitației termenul Λ , aceste ecuații vor avea ca una dintre soluții lumea sferică a lui Einstein și, în acest caz, densitatea medie a substanței $\rho_E = \frac{c^2 \Lambda_E}{4\pi G} = \frac{c^2}{4\pi G \sqrt{\Lambda_E R_E^3}}$, întrucît raza de curbura pentru lumea lui Einstein este R_E .

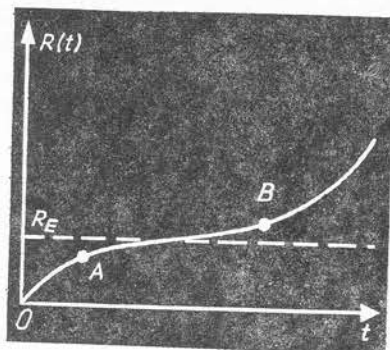


Fig. 13. Modificarea în timp a razei de curbura și a distanțelor în modelul lui Lemaitre.

$= \frac{1}{\sqrt{\Lambda_E}}$. Dacă acum vrem să-l exprimăm pe Λ_E în funcție de ρ_E , vom avea $\Lambda_E = \frac{c^4}{(4\pi G \rho_E R_E^3)^2} = \frac{4\pi G \rho_E}{c^2}$. Am mai folosit această

expresie, în care am introdus acum doar indicele „E” pentru constanta Λ . Sensul introducerii acestui indice constă în faptul că pentru o lume statică și sferică densitatea și constanta Λ sînt legate între ele. Ce se va întîmpla însă dacă la o valoare dată a densității ρ constanta Λ va fi ceva mai mare sau ceva mai mică decît $\Lambda_E = \frac{c^4}{(4\pi G \rho R^3)^2}$?

În acest caz, după cum a arătat încă Fridman, vom avea numai soluții nestaționare; în special pentru $\Lambda = 0$, vom obține soluțiile fridmaniene despre care am mai vorbit (vezi fig. 9, 10 și 11). Un caz particular deosebit și foarte interesant, denumit *modelul lui Lemaitre*, apare cînd constanta Λ este ceva mai mare decît valoarea $\Lambda_E = \frac{c^4}{(4\pi G \rho_E R_E^3)^2}$, corespunzătoare modelului lui Einstein.¹

În modelul lui Lemaitre, dependența razei de curbura R de timpul t prezintă un palier (fig. 13) tocmai cînd R este apropiat de R_E (raza lumii după Einstein pentru o valoare dată a lui Λ). Cu cît această valoare Λ este mai aproape de Λ_E , cu atît universul va fi mai apropiat prin parametrii săi, pentru un interval de timp mai mare, de lumea statică a lui Einstein.

Lucrul acesta nu este greu de înțeles.

¹ În modelul lui Einstein, după cum am văzut, este indiferent dacă notăm Λ_E sub forma $\frac{4\pi G \rho_E}{c^2}$ sau sub forma $\frac{c^4}{(4\pi G \rho_E R_E^3)^2}$. Dar, în modelul staționar, densitatea ρ se schimbă, iar mărimea ρR^3 , proporțională cu masa totală, rămîne constantă; de aceea trebuie să comparăm, bineînțeles, pe Λ cu $\Lambda_E \approx \frac{c^4}{(4\pi G \rho R^3)^2}$.

În limbaj clasic, sensul introducerii termenului Λ constă în faptul că prin aceasta se presupune existența unei anumite forțe de respingere, care acționează în afară de forțele de atracție obișnuite din teoria gravitației. Fără termenul Λ , atracția nu este compensată de nimic și, dacă am „opri” universul, el ar începe să se contracte.

În teoria lui Newton, introducerea unor noi forțe, de respingere, ar părea un lucru foarte ciudat, cu atît mai mult că aceste forțe trebuie să crească o dată cu creșterea distanței dintre corpuri și să nu depindă de masa lor. În teoria relativității generalizate nu se introduce și nu se iau în considerare în formă explicită nici un fel de forțe, termenul Λ intrînd în teorie în mod firesc și organic. Dar, la drept vorbind, prin aceasta esența lucrurilor nu se schimbă: de fapt, în felul acesta apar forțe de respingere sui-generis sau, mai exact, apar „forțe” care dilată spațiul însuși.

Lumea sferică a lui Einstein corespunde tocmai echilibrului dintre atracție și respingere. Dacă însă Λ este ceva mai mic decît valoarea lui Einstein, Λ_E , corespunzătoare modelului universului cu o masă dată, nu se poate stabili un echilibru, și pe palier (porțiunea AB din fig. 13) diferența dintre atracție și respingere este mică. Tocmai din această cauză apare palierul, respectiv o regiune de modificare lentă a razei de curbura a lumii¹. Perioada „opririi” (adică lungimea palierului AB , fig. 13) oferă timp suficient pentru formarea galaxiilor și a quasarelor. De aceea, dacă „opririi” îi corespunde tocmai valoarea $z = 1,95$ (să ne amintim că parametrul z este legat în mod univoc de timp), atunci pentru mărimi ale lui z egale sau apropiate de această valoare trebuie să apară mulți quasar și multă substanță de absorbție. În felul acesta se pot explica particularitățile menționate mai sus ale spectrului quasarelor.

Tocmai această idee au exprimat-o Petrosian, Salpeter și Szekers. Potrivit calculelor lui N.S. Kardașev, în cazul mode-

¹ Forțele de atracție (propriu-zis gravitația) și de respingere (legate de termenul Λ) depind în mod diferit de raza de curbura R . Cînd R are valori mici (porțiunea HA din fig. 13), prevalează forțele de atracție și soluția este apropiată de cea a lui Fridman. La dreapta punctului B predomină rolul termenului Λ . De aceea, numai în regiunea AB forțele de atracție și de respingere sînt aproximativ egale și raza variază lent cu timpul.

lului lui Lemaître cu „oprire“ pentru $z = z_0 = 1,95$, în epoca noastră

densitatea $\rho_{actual} = 1,8 \cdot 10^{-30} \text{ g/cm}^3$,

raza de curbura $R_{actual} = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ ani-lumină} = 1,4 \cdot 10^{23} \text{ cm}$.

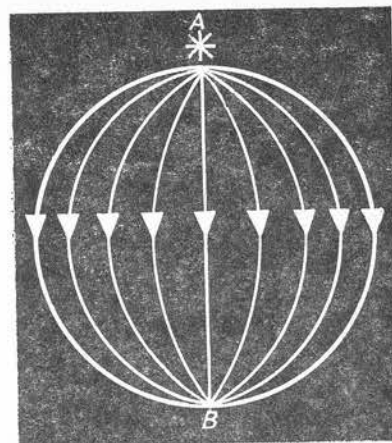
În perioada „opririi“, densitatea a fost însă de aproximativ treizeci de ori mai mare, iar raza de vreo trei ori mai mică. Valoarea constantei Λ în acest model este egală cu $4,3 \cdot 10^{-56} \text{ cm}^{-2}$, fiind foarte apropiată de Λ_E . Dacă liniile de absorbție în spectrele quasarelor îndepărtați sînt foarte apropiate de valoarea $z = 1,95$, astfel încît împrăștierea valorilor să nu treacă de 1%, vom avea $\frac{\Lambda - \Lambda_E}{\Lambda_E} = 2 \cdot 10^{-5}$.

Durata „opririi“ universului se cifrează în acest caz la circa 50 de miliarde de ani. Epoca noastră s-ar situa la vreo 70 de miliarde de ani de la „origine“.

Toate aceste cifre le cităm doar pentru ilustrare. În prezent problema spectrelor quasarelor încă nu este bine lămurită. Mulți astronomi se îndoiesc chiar de caracterul real al concentrării valorilor z pentru multe linii de absorbție în vecinătatea valorii $z = 1,95$. Afară de aceasta, unii quasari au cu siguranță linii de absorbție pentru care valorile lui sînt inegale. În aceste cazuri (sau, poate în toate cazurile) este posibilă următoarea explicație a apariției liniilor de absorbție; quasarul explodează din cînd în cînd și emite o anvelopă gazoasă care se depărtează de el cu o mare viteză. Tocmai în aceste anvelope are loc absorbția luminii; totodată, după cum se poate vedea foarte lesne, în spectrul unui quasar parametrul z pentru liniile de absorbție este totdeauna mai mic decît pentru liniile de emisie (este evident că diferența $z_{emisie} - z_{absorbție}$ este determinată de viteza cu care învelișul absorbant se mișcă în raport cu quasarul). În concluzie nu avem astăzi motive reale să considerăm că modelul lui Lemaître este valabil; după toate probabilitățile, el nu are nimic comun cu realitatea.

Nu avem deci nici un motiv să considerăm deocamdată că observarea quasarelor a demonstrat vreo „oprire“ în expansiunea universului sau cel puțin existența termenului Λ . Este clar altceva: lucrurile s-au urnit din loc. Problema termenului Λ și a influenței lui asupra universului nu mai are un caracter abstract, ea a devenit o problemă reală care poate fi studiată pe baza observației. Aceasta se referă în mod special la modelul lui Lemaître cu „oprire“. Constatarea „opririi“ ar fi dacă

Fig. 14. Dacă lumina se propagă de-a lungul cercurilor mari, fiind emisă în punctul A , ea se va concentra la polul opus al sferei, în punctul B .



nu o demonstrație, cel puțin un argument cu pondere mare în favoarea existenței termenului Λ , și anume cu valori apropiate de $\lambda_E = \frac{c^2}{(4\pi G \rho R^2)^2}$. Unele idei enunțate sugerează că apariția termenului Λ reflectă existența unor efecte cuantice în spațiu.

Menționăm că în modelul Lemaître (modelul cu „oprire“, ca și în lumea sferică a lui Einstein, poate fi observată în principiu o anumită focalizare a razelor de lumină. Focalizarea este consecința curbării pozitive a spațiului: ea poate fi explicată în modul cel mai simplu cu ajutorul unui model bidimensional sferic. În cadrul unui asemenea model, lumina se propagă prin ipoteză de-a lungul cercurilor mari ale sferei. Așadar, lumina emisă în punctul A se va concentra în punctul B , la celălalt „pol“ (fig. 14). Lumina poate, de asemenea, să ocolească sfera de cîteva ori. De fapt, din pricina caracterului neomogen al universului considerat „în detaliu“ (există stelele și aglomerările acestora, galaxiile), lumina care urmează diverse căi va devia pe fiecare traseu într-un mod puțin diferit. Ca urmare, imaginea unui quasar îndepărtat trebuie să se „multiplice“ sau, cum se spune, trebuie să apară „fantome“, mai multe imagini ale aceleiași surse. Căutarea „fantomelor“ este încă o cale de verificare a ipotezei cu privire la existența în trecut a unei „opriri“ în procesul dilatării universului.

În funcție de alegerea modelului și în special când se folosește modelul Lemaître, scara timpului și aprecierea vârstei surselor se schimbă. Pentru expunerea de mai jos, această nedeterminare vom considera în cele ce urmează timpul în cadrul modelului Fridmanian simplu, în care termenul $\Lambda = 0$, iar spațiul este cel euclidian (modelul Einstein-de Sitter). Procedând astfel, trebuie să avem în vedere că în stadiile „timpurii” ale evoluției (în apropierea punctului $t = 0$ în figurile 9, 10, 11 și 13) deosebirea dintre celelalte modele Fridmaniene, inclusiv modelul Lemaître, pe de o parte, și modelul Einstein-de Sitter, pe de altă parte, poate fi neglijată. Or, acum ne va interesa în primul rând tocmai trecutul îndepărtat din preajma „originii”. De aceea, folosind în continuare modelul Einstein-de Sitter, putem comite o eroare substanțială în determinarea timpului care s-a scurs de la „origine” până în epoca noastră, dar nu și în privința aprecierii intervalului de timp socotit de la „origine” până la, bunăoară, momentul situat cu câțiva ani sau chiar cu câteva mii de ani mai târziu.

Înapoi spre „origine”. Radiația termică remanentă

În 1965 s-au descoperit radiații de unde radio care au fost emise cu multe miliarde de ani în urmă, chiar cu mult înainte de formarea Galaxiei și a quasarelor. Aceasta înseamnă că faza pregalactică a evoluției universului a existat cu adevărat.

Quasarii ne permit să aruncăm o privire în epoca situată cu aproximativ opt miliarde de ani în urmă (am precizat mai sus că această cifră este destul de convențională). Această durată poate fi socotită în același timp foarte mare și foarte mică dacă este vorba de studiul etapelor timpurii ale evoluției universului. În epoca corespunzătoare valorilor lui z mai mari decât 3 sau 5, quasarii și galaxiile încă nu se formaseră probabil și deci aceste „reper” nu ne pot ajuta să urmărim evoluția universului în faze și mai timpurii. Pentru aceasta trebuie să obținem informații despre epoca pregalactică din viața universului. Este oare posibil lucrul acesta?

Pentru a răspunde la această întrebare, să considerăm un anumit model. Să presupunem în primul rând că modelele Frid-

maniene (sau chiar, în mod concret, modelul Einstein-de Sitter) rămân valabile până la „origine”, respectiv pentru $t = 0$, sau până la valori foarte mici ale lui t . În al doilea rând, să admitem că, în epoca valorilor mici ale lui t , universul era „fierbinte”. În procesul dilatării, temperatura substanței și a radiațiilor scade, așa cum se răcește un gaz dacă mărim volumul recipientului în care este închis și, invers, cu cât este mai mare densitatea, cu cât universul se află mai aproape de „origine”, cu atât este mai mare temperatura T în „modelul fierbinte” (la „origine”, când densitatea este infinită, este infinită și temperatura; după cum am spus și după cum vom mai sublinia mai jos, acest infinit are un caracter convențional).

Să considerăm mai întâi momentul situat la un interval de mai multe zile sau de mai mulți ani de la „origine”. În această fază, substanța din univers se afla într-o stare ionizată, era o plasmă constituită din electroni, protoni și nuclee ale elementelor ușoare, în special heliu (elementele mai grele se formează, pe cât se pare, mai târziu, în procesul evoluției stelelor). Afară de aceasta, era prezentă radiația electromagnetică (unde radio, lumină, raze Roentgen), care se afla în echilibru cu particulele, adică avea aceeași temperatură. Acest echilibru are un caracter dinamic: particulele (în cea mai mare parte electroni) emit și absorb fotoni, dar în medie tabloul — dacă nu ținem seama de dilatare — nu se modifică. Dar iată că, la câteva sute de mii de ani de la „origine”, temperatura scade până la $T_{\text{radiație}} = 3\,000 - 4\,000^\circ \text{K}$, densitatea ρ ajunge la aproximativ 10^{-20} g/cm^3 (concentrația atomilor $n \cong 10^4 \text{ cm}^{-3}$) și electronii încep să se recombine, să se unească cu ionii, formând atomi de hidrogen, de heliu etc. Mediul devine în aceste condiții transparent pentru radiație și „se rupe” de radiație, adică în mod practic încețoază să emită și să absoarbă concomitent și în egală măsură.

Ce se va întâmpla în continuare cu radiația? Ea va rămâne termică (sau — cum se spune — „radiație de corp negru” în ceea ce privește componența ei spectrală), dar temperatura ei va scădea mereu, și anume invers proporțional cu distanța caracteristică R , care poate fi considerată, de pildă, ca distanța

¹ În cazul dilatării unui recipient în care se găsește gaz necomprimat, temperatura gazului scade. La fel scade temperatura radiației în cazul dilatării universului. Acest fenomen poate fi mai ușor înțeles considerând că datorită deplasării spre roșu lungimea de undă crește și, prin urmare, scade energia cuantelor de lumină, respectiv a fotonilor.

dintre două particule îndepărtate oarecare din universul în expansiune. În modelul simplu pe care îl folosim, epocii noastre îi corespunde timpul $t_{actual} \cong 10^{10}$ ani, precum și densitatea ρ_{actual} egală cu 10^{-29} g/cm³. Densitatea ρ variază invers proporțional cu R^3 (masa substanței este proporțională cu ρR^3 , conservându-se în condițiile luate în considerare). De aici reiese clar că densitatea $\rho_{radiație} \approx 10^{-20}$ g/cm³ corespunde micșorării distanței R de o mie de ori în comparație cu valoarea actuală. Temperatura a fost la acea epocă de o mie de ori mai mare decât astăzi, adică, după cum am arătat, $T_{radiație} \approx 3\,000 - 4\,000^\circ\text{K}$. Ajungem la concluzia că, în cazul modelului „fierbinte”, universul trebuie să fie astăzi plin de o radiație aflată la temperatura $T_{actual} = 3 - 4^\circ\text{K}$ (grade absolute, raportate la zero absolut, căruia îi corespunde temperatura de -273°C)¹. Spectrul unei asemenea radiații pentru o temperatură de 3°K este reprezentat de curba din

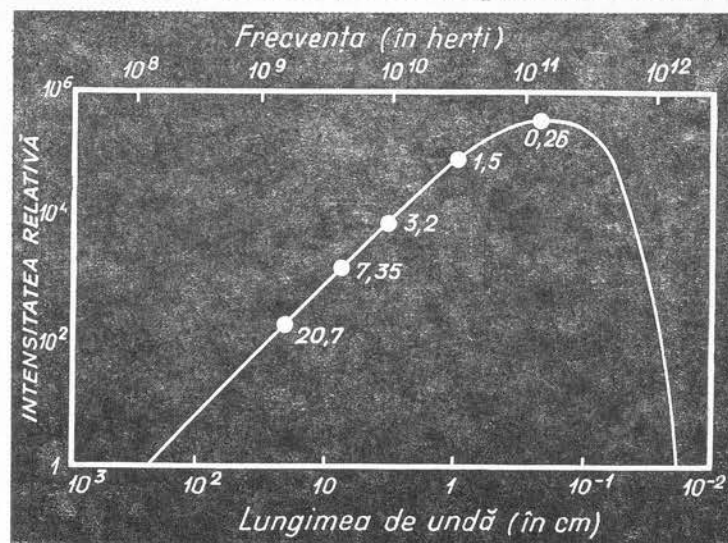


Fig. 15. Spectrul radiației de echilibru (a corpului negru) cu temperatura $T = 3^\circ\text{K}$ (grade absolute).

¹ De fapt, valorile $\rho_{radiație}$ și $T_{radiație}$ se determină tocmai pe baza măsurării temperaturii T_{actual} și a folosirii valorii $\rho_{actual} = 10^{-29}$ g/cm³. Pentru simplitatea expunerii, noi am început cu valorile $\rho_{radiație}$ și $T_{radiație}$.

figura 15. Intensitatea radiației este maximă pentru unda cu lungimea de 1,5 mm, dar ea este destul de mare și pentru domeniul lungimilor de undă centimetrice sau chiar decimetrice. Este interesant că, de fapt, încă cu douăzeci de ani în urmă s-a tras concluzia privitoare la existența unei asemenea radiații într-un model „fierbinte”, dar între timp a fost oarecum uitată. Aceasta se explică în bună parte prin nivelul de dezvoltare a radioastronomiei, care într-un trecut nu prea îndepărtat nu putea să asigure măsurarea unei temperaturi atât de joase ca $3-4^\circ\text{K}$.

Succesele radiotehnicii au schimbat însă situația și în 1965 au permis detectarea radiației despre care este vorba. Ea este denumită radiație termică cosmică remanentă. În cele ce urmează o vom numi pe scurt *radiație remanentă* emițând atribuțiile „termică” și „cosmică”.

După cum s-a mai întâmplat în istoria științei, radiația remanentă nu a fost descoperită ca urmare a unor cercetări speciale organizate, ci mai mult sau mai puțin întâmplător. Antena de mare sensibilitate de la laboratorul Societății de telefoane Bell, care funcționează pe lungimea de undă de 7,35 cm, a recepționat o radiație care la început a fost considerată drept un parazit apărut în aparatură. În cele din urmă a reieșit însă că antena recepționează o radiație extraterestră cu o temperatură de 3°K . Ulterior, această radiație a fost găsită și pe lungimile de undă de 20,7 cm, 3,2 cm și 0,26 cm (astăzi există date și pentru alte lungimi de undă). În toate cazurile temperatura este de 3°K , deși precizia nu este prea mare (de pildă nu este exclusă valoarea de $2,5^\circ\text{K}$; cea mai probabilă valoare acceptată în ultimul timp este de $2,7^\circ\text{K}$). Dacă radiația este, într-adevăr, o radiație termică, trebuie obținută aceeași temperatură pentru toate undele, ceea ce se și constată.

În felul acesta, în prezent s-a stabilit cu un grad de certitudine mai mare valabilitatea modelului „fierbinte” și totodată ne-am putut apropia dintr-o dată de la o depărtare de 2 miliarde de ani de la „începutul” dilatării până la aproximativ 300 000 de ani de la acesta (numărați de la „origine”). Cu alte cuvinte, ca urmare a recepționării radiației remanente, s-a putut ajunge la valori ale lui $z \approx 1\,000$, în timp ce pentru cele mai depărtate surse cunoscute, quasarii, parametrul z este mai mic decât 3. Poate că cea mai im-

portantă concluzie constă în faptul că universul trebuie să fi fost pe vremuri de un miliard de ori mai dens decât astăzi. Aceasta era de așteptat în cazul modelelor considerate ale unui univers în expansiune, dar să ne gândim că aceste modele se pot dovedi de la o anumită epocă nevalabile. Astăzi însă nu numai că presupunem, ci chiar știm că stadiul de dilatare a universului durează multe miliarde de ani și că odinioară universul arăta cu totul altfel: nu conținea nici galaxii, nici quasari, fiind constituit doar din plasmă și radiații cu o temperatură înaltă.

Și mai aproape de „origine“

Conform modelelor cosmologice simple, substanța din univers a fost odinioară foarte densă și fierbinte. În acele stadii ale evoluției universului erau emise particule neutrino și se formau nuclele ale unor elemente chimice ușoare.

Este firesc să presupunem, ceea ce în fond am și făcut mai sus, că universul se dilata și înainte de epoca „ruperii“ radiației de substanță, adică înainte de perioada $t_{radiație} \approx 300\,000$ de ani. Radiația electromagnetică care a apărut în această perioadă mai veche nu ne poate parveni: ea este absorbită. Totuși, în principiu, pare posibil să primim informații despre fazele mai vechi ale dilatării (dacă ele au existat!).

Într-un model „fierbinte“, la un timp $t_x \approx 100$ s (!) de la „origine“, densitatea $\rho_x \approx 100$ g/cm³, deci de o sută de ori mai mare decât densitatea apei. Cît despre temperatură, ea este de 10^9 grade. În acest stadiu, substanța constă mai ales din protoni, neutroni și electroni, dar protonii se combină în mod activ cu neutronii, formînd heliul și cîteva alte elemente ușoare (tocmai de aceea ne-am oprit la momentul $t_x \approx 100$ s). Aceia dintre neutroni (de altfel foarte puțini) care nu apucă să se combine cu protonii se dezintegrează (neutronul se dezintegrează în medie în decurs de 1 000 s; rezultatul acestei dezintegrări sînt un proton, un electron și un neutrino)¹.

Pentru modelele fridmaniene „fierbinți“ (în apropierea „originii“ toate aceste modele sînt practic nediferențiate), cantiti-

¹ Pentru simplificare nu vom face diferență între neutrino ν și antineutrino $\bar{\nu}$, care iau parte la reacțiile n (neutron) $\rightarrow p$ (proton) $+ e^-$ (electron) $+ \bar{\nu}$ (antineutrino) și $p \rightarrow n + e^+$ (pozitron) $+ \nu$ (neutrino). Menționăm, de asemenea, că toate cifrele de care ne servim au un caracter estimativ.

tatea de heliu ce se formează trebuie să reprezinte cam 7% sau 8% din numărul de nuclee (restul de aproximativ 90% trebuie să fie protoni, iar toate celelalte elemente se găsească în număr foarte mic — mai puțin de 1%).

De aici reiese că determinarea cantității de heliu existente în univers constituie o metodă de verificare a modelului fridmanian „fierbinte“. Datele existente arată că, într-adevăr, în univers există o mare cantitate de heliu: aproximativ 5—10%, dar nu în toate cazurile; există stele a căror atmosferă este săracă în heliu. Este posibil însă ca în aceste condiții speciale absența heliului să aibă o origine secundară. Această problemă se cercetează, dar în prealabil se poate spune că datele privitoare la componența chimică a substanței confirmă valabilitatea modelului „fierbinte“.

În momentul $t_{neutrino} \approx 0,3$ s (!), densitatea $\rho_{neutrino} \approx 10^7$ g/cm³, iar temperatura $T_{neutrino} \approx 3 \cdot 10^{10}$ grade. Tocmai în acest moment, neutrinii „se rup“ de nucleoni (protoni și neutroni). Sensul acestei afirmații este același ca și în cazul „ruperii“ radiației electromagnetice, cînd $\rho_{radiație} \approx 10^{-20}$ g/cm³: pentru densitățile mai mari decât $\rho_{neutrino} \approx 10^7$ g/cm³, neutrinii sînt absorbiți de substanță (rolul principal avîndu-l procesul $\nu + \bar{\nu} \rightarrow e^+ + e^-$); începînd însă cu densitatea $\rho_{neutrino} \approx 10^7$ în univers în expansiune, neutrinii practic nu mai sînt absorbiți și sînt nevoiți „să supraviețuiască“ pînă în epoca noastră. În ceea ce privește uriașa deosebire dintre densitățile $\rho_{radiație}$ și $\rho_{neutrino}$, ea este legată de faptul că neutrinelul intră mult mai slab în interacțiune cu substanța decât radiația electromagnetică. În momentul „ruperii“, energia neutrinelului este mare (temperatura $T_{neutrino} \approx 3 \cdot 10^{10}$ grade, ceea ce corespunde unei energii medii de aproximativ $3 \cdot 10^6$ eV). Dar, pe măsura dilatării universului, temperatura (energia) neutrinelului scade și, potrivit modelului admis, neutrinelul trebuie să aibă în epoca noastră o temperatură egală cu numai 2°K (energia medie fiind de ordinul cîtorva zecimi de miimi de electronvolt).

Oamenii de știință încă nu știu să înregistreze neutrinii cu o asemenea energie și într-un număr atît de mare. Astăzi, această problemă pare chiar extraordinar de complicată. Pentru rezolvarea ei, sensibilitatea măsurătorilor ar trebui să crească de sute de mii de ori. Cu toate acestea, putem presupune că tocmai astronomiei neutrinoice îi aparține un viitor glorios.

Posibilitatea de a recepționa neutrini emiși din interiorul Soarelui în procesul reacțiilor nucleare care îl încălzesc pare și ea, într-un trecut apropiat, un vis cu greu realizabil. În cazul Soarelui, astăzi nu mai există nici o îndoială că astronomia neutrinică va aduce roade, și aceasta chiar într-un viitor care nu mai este departe.

Este de asemenea foarte reală posibilitatea de a înregistra fluxurile de neutrini care se formează cu prilejul unor „catastrofe” stelare (avem în vedere, de pildă, apariția supranovelor). În ceea ce privește neutrinii de proveniență cosmologică, emiși, de pildă, la 0,3 s de la „originea” dilatării universului, perspectivele de observare a acestora nu par să predisună la optimism. Totuși, progresul în acest domeniu are loc atât de rapid, încât punctul de vedere optimist asupra posibilităților astronomiei neutrinice pare justificat. Afară de aceasta, să nu uităm că, de fapt, deducția că temperatura neutrinelor de origine cosmologică trebuie să fie egală cu 2°K este valabilă numai pentru modelul cel mai simplu. Ce se întâmplă însă dacă expansiunea universului, deși a avut loc într-adevăr și în stadii foarte dense, nu a fost în acea perioadă izotropă, adică egală în toate direcțiile?

După cum au arătat în 1967 A.G. Doroșkevici, I.B. Zeldovici și I.D. Novikov, în cazul modelelor cu o dilatare anizotropă în stadiile timpurii ale evoluției universului — modele categorice posibile în principiu —, neutrinii pot avea în epoca noastră o energie foarte înaltă. În acest caz, măsurarea este considerabil mai ușoară decât pentru neutrinii „reși” și în anumite limite pare realizabilă într-un viitor apropiat. Sîntem în drept să nădăjduim că astronomia neutrinică ne va aduce într-adevăr informații despre dezvoltarea universului în stadiile cu o densitate $\rho_{\text{neutrino}} \approx 10^7 \text{ g/cm}^3$. Ar fi desigur deosebit de importantă însăși demonstrarea faptului că asemenea stadii au existat cîndva. Deocamdată însă putem să admitem, pe baza unor argumente teoretice suficiente, că sînt posibile stări și mai dense. De pildă, pentru modelele fridmaniene, cînd $t_{\text{nucleu}} \approx 10^{-4} \text{ s}$ (!!!), densitatea substanței $\rho_{\text{nucleu}} \approx 10^{14} \text{ g/cm}^3$, ceea ce corespunde aproximativ densității substanței în nucleele atomice.

Ceva mai jos vom vorbi despre stadii și mai dense. Această problemă este organic legată de însăși problema „originii” dilatării. Dar pînă la densitățile $\rho_{\text{nucleu}} \approx 10^{14} \text{ g/cm}^3$ am avut tot timpul de-a face cu substanța aflată în stări care ne sînt cunoscute, fără

a depăși limitele concepțiilor fizicii moderne. Ce-i drept, după menționarea momentului $t_x \approx 100 \text{ s}$, $t_{\text{neutrino}} \approx 0,3 \text{ s}$ și $t_{\text{nucleu}} \approx 10^{-4} \text{ s}$ de la „origine”, am pus semne de exclamare, dar acest procedeu nu a fost întru totul corect. Asemenea cifre surprind numai dacă le comparăm cu intervalele de timp care se întîlnesc în practica umană obișnuită. Să ne gîndim însă că în stadiile evoluției universului despre care discutăm aici, nici pomeneală nu era de ființe vii. Tocmai de aceea trebuie să comparăm momentele t_x , t_{neutrino} și t_{nucleu} cu intervalele de timp caracteristice fizicii atomice și nucleare, care sînt încă mult mai mici. Astfel, timpul atomic caracteristic $t_{\text{atom}} \approx 10^{-16} \text{ s}$ (este timpul în care un electron cu o „viteză atomică” tipică de 10^8 cm/s va străbate o „distanță atomică” de un ordin de mărime egal cu 10^{-8} cm). Timpul caracteristic fizicii nucleului atomic și particulelor elementare este $t_{\text{part. elem.}} \approx 10^{-21} \text{ s}$, fiind egal cu raza de acțiune a forțelor nucleare (de ordinul 10^{-13} cm) împărțit la viteza luminii. În comparație nu numai cu $t_{\text{part. elem.}}$, dar chiar cu timpul atomic $t_{\text{atom}} \approx 10^{-16} \text{ s}$, timpul de 10^{-4} s de la „origine” este imens.

În mintea cititorului s-a născut, probabil, întrebarea: putem oare obține informații despre stadiile de dilatare cu densitatea ρ mai mare decât $\rho_{\text{neutrino}} \approx 10^7 \text{ g/cm}^3$? Tocmai în momentul cînd densitatea este egală cu ρ_{neutrino} , neutrinii „se rup” de substanță și, prin urmare, nu ne pot parveni din stări mai dense. Totodată, neutrinii sînt particulele cu cea mai mare putere de penetrație din cîte cunoaștem.

Drept răspuns la întrebarea pusă, vom observa următoarele: în primul rînd, în fizică (și nu numai în fizică), un rol uriaș revine izvoarelor indirecte de informație. În mod concret, comportarea modelului cosmologic în condițiile unor densități egale sau mai mici decât $\rho_{\text{neutrino}} \approx 10^7 \text{ g/cm}^3$ este într-o măsură considerabil determinată de comportarea lui în cazul unor densități mai mari. În această ordine de idei este neîndoielnic că, ajungînd pînă la faza de dilatare cu o densitate de ordinul ρ_{neutrino} , am putea de fapt obține informații despre fazele de dilatare și mai apropiate de „origine”. În al doilea rînd, nu este cu totul corect să considerăm neutrinelor drept agenții cel mai penetrant, deoarece undele gravitaționale au o putere de penetrație și mai mare.

Undele gravitaționale constituie încă un „vlăstar” al teoriei relativității generalizate. În 1916, Einstein a atras atenția asu-

pra posibilității și, în fond, asupra inevitabilității existenței lor. După cum am mai subliniat, teoria relativității generalizate este teoria câmpului gravitațional și generalizează teoria gravitației a lui Newton în același sens în care electrodinamica (teoria câmpului electromagnetic) generalizează electrostatica. Or, un fenomen tipic pentru electrodinamică pot fi considerate undele electromagnetice care se propagă cu viteza luminii, deși în cazul electrostaticii asemenea unde nu există.

Undele gravitaționale sînt analoge undelor electromagnetice. Ele reprezintă perturbații ale câmpului gravitațional care se propagă cu viteza luminii. Sosirea unei unde gravitaționale trebuie să se manifeste în modificarea forței gravifice, ceea ce se va repercuta asupra mișcării corpurilor, de pildă a sateliților Pământului. Dar chiar asemenea surse relativ puternice de radiație ca stelele duble (două stele care se mișcă în jurul unui centru comun al maselor lor) emit unde gravitaționale insuficient de intense, încît la nivelul actual al tehnicii nu pot fi recepționate pe Pămînt.

De aceea, recepționarea undelor gravitaționale încă nu s-a realizat, rezolvarea acestei probleme fiind unul dintre obiectivele cele mai interesante și mai dificile ale fizicii contemporane¹. Urmînd faimoasa recomandare de a nu încerca să cuprindem necuprinsul, să ne limităm doar la observația că undele gravitaționale sînt absorbite și mai slab decît neutrinii și de aceea ne-ar putea parveni din regiunile (mai exact „din stările”) cu o densitate apreciabil mai mare decît $\rho_{\text{neutrino}} \approx 10^7 \text{ g/cm}^3$, mergînd pînă la densități de o mărime fantastică de același ordin ca și $\rho_{\text{gravitațional}} \approx 4 \cdot 10^{93} \text{ g/cm}^3$. Așadar, există o perspectivă, fie ea chiar depărtată și nebuloasă, de a realiza observații astronomice asupra undelor gravitaționale și, în particular, de a cerceta cu ajutorul acestor unde faze și mai apropiate de „origine”.

Ghilimelele salvatoare nu l-au împăcat, desigur, pe cititor cu „originea” la care ne-am referit în repetate rînduri. Ne-a rămas să discutăm tocmai problema acestei „origini”, dar, în-

¹ În februarie 1969 s-a anunțat descoperirea unei puternice radiații gravitaționale care provine, poate, din centrul Galaxiei. Dar datele respective și mai ales interpretarea lor nu sînt suficient de convingătoare; ele reclamă o verificare și confirmare multilaterală.

inte de aceasta, este indicat să facem o anumită digresiune pentru a expune unele considerații privind legătura dintre cosmologie și filozofie.

Cosmologie și filozofie

Problema alegerii unui model cosmologic, a caracterului finit sau infinit al volumului în aceste modele și a caracterului evoluției universului în timp este o problemă a științelor naturii și trebuie rezolvată pe baza observațiilor. În această privință nu este admisibil să se facă nici un fel de afirmații preconcepute.

Problemele fundamentale ale științei au atras întotdeauna și atrag și acum atenția filozofilor. Faptul acesta este explicabil în lumina istoriei dezvoltării și formării filozofiei și este justificat de esența lucrurilor: tocmai în domeniul fundamentelor fizicii, astronomiei și biologiei dăm de probleme principiale și în același timp cu totul neclare. Este firesc ca discutarea acestor probleme, încercările de a le rezolva să solicite eforturi deosebit de mari gîndirii, constituind un fel de laborator al logicii și al teoriei cunoașterii.

Nu putem însă să nu recunoaștem că într-un număr însemnat de cazuri asemenea „preocupări de laborator” ale filozofilor nu au adus științei folos, ba uneori i-au pricinuit serioase prejudicii. O privire retrospectivă ne arată că nu există, poate, nici o singură mare teorie din domeniul fizicii, astronomiei și biologiei care să nu fi fost calificată de reprezentanții diverselor curente filozofice drept falsă sau chiar antiștiințifică și subversivă. Forma sferică a Pământului, sistemul lui Copernic, pluralitatea lumilor, teoria relativității, mecanica cuantică, universul în expansiune, teoria evoluționistă a lui Darwin, legile lui Mendel și concepția despre gene — toate acestea au fost proclamate la un moment dat „false din punct de vedere filozofic”, toate au fost combătute „de pe poziții filozofice”.

Cauza acestei atitudini constă în faptul că în trecut filozofii nu numai că au acumulat, ci au și absolutizat concepții izvorite, ce-i drept, din științele naturii dar formate în perioada precedentă. De aceea, multora dintre ei li s-a părut că altfel nu poate să fie, că renunțarea la concepțiile statornicite este inadmisibilă. Este important să subliniem aici că o asemenea tendință este cu totul firească într-o anumită etapă, fiind

proprie și majorității oamenilor de știință. Dar cei mai înaintați dintre aceștia au reușit și reușesc și astăzi să depășească limitele postulatelor elaborate de obișnuință și de „bunul-simț”. Ei reușesc s-o facă sub presiunea invincibilă a faptelor, după încercări stăruitoare, dar zadarnice, de a „salva” vechile concepții. Cât despre concepțiile noi, acestea s-au născut în chinuri (chinuri la propriu, după cum o atestă istoria științei). Și tot în chinuri s-a născut înțelegerea faptului că este inevitabilă renunțarea la unele idei vechi, atât de „comode” și de „clare”. Cât despre omul care privește lucrurile „din exterior”, caracterul neobișnuit și surprinzător al ideilor și teoriilor noi copleșește toate celelalte considerente tocmai pentru că noile concepții nu au pătruns în conștiința lui ca o urmare a procesului firesc al „durerilor facerii”. De aici și încercările de a nega ideile noi, încercări care par deosebit de îndreptățite celor ce-și închipuie că au găsit, în fine, piatra filozofală.

Observațiile de mai sus nu constituie, desigur, un atac împotriva acelor care manifestă interes pentru filozofie și se ocupă cu filozofia și cu atât mai puțin împotriva filozofiei însăși. Ele constituie doar o încercare de a sublinia că este necesar să se pună capăt odată pentru totdeauna vechilor greșeli și să înțelegem caracterul și locul filozofiei contemporane. Căci, după cum s-a arătat în orice manual de filozofie elaborat în concepția noastră, filozofia contemporană nu este o „știință a științelor”, nu este ceea ce a fost „filozofia naturii” în trecut. Și totuși, acest adevăr consemnat în manuale a fost foarte frecvent ignorat pînă recent de tot. Or, filozofiei contemporane îi este cu totul străină (mai exact trebuie să-i fie cu totul străină) orice tentativă de a impune naturii legile filozofiei și de a rezolva aprioric problema „valabilității” sau „falsității” teoriilor științifice.

Atunci cînd un filozof se preocupă de o problemă legată de științele naturii, el trebuie, după părerea mea, să se întrebe în primul rînd: ce este aceasta, o problemă filozofică sau o problemă științifică? Cu alte cuvinte, dacă vrei, trebuie să considerăm drept o problemă filozofică importantă și principală stabilirea granițelor filozofiei. Mai întîi trebuie „să ne delimităm”, să „decelăm” problema filozofică și abia după aceea să definim atitudinea filozofiei față de această problemă.

Este oare viteza luminii viteza limită de propagare a semnalelor și, în general, există oare o viteză limită, maxima po-

sibilă, a semnalelor? S-ar părea că nu pot exista îndoieli asupra faptului că aceasta este o problemă fizică și nu filozofică. Căci este limpede că la această întrebare poate să dea un răspuns numai experiența, ea neputînd fi rezolvată aprioric. Orice răspuns s-ar da (că viteza limită este finită sau că ea este infinită), acest răspuns nu afectează în nici o măsură problema caracterului primordial sau secundar al conștiinței, legile logicii, infirmarea sau recunoașterea diverselor credințe religioase etc. Și totuși, nu este greu să găsim în literatura noastră afirmația că a considera viteza luminii drept viteza limită este o concepție idealistă. La fel au stat lucrurile cu noțiunile probabilistice în teoria euantelor, cu legile lui Mendel, cu unele concluzii ale teoriei relativității etc. În cosmologie, ideile cu privire la caracterul finit al volumului universului și cu privire la dilatarea universului erau calificate ca idealiste, reacționare și „popești”. Toate acestea, ca să folosim un eufemism, constituie o neînțelegere, o confuzie între problemele filozofice și cele științifice, o trasare greșită a hotarelor dintre filozofie, pe de o parte, și fizică, astronomie sau biologie, pe de altă parte.

În domeniul cosmologiei, poziția materialistă constă în recunoașterea existenței universului cu totul independent de conștiința umană și efectiv înainte de apariția acestei conștiințe. Afară de aceasta, combătînd nu numai idealismul subiectiv, ci și idealismul obiectiv și religia, materialistul neagă existența unui Dumnezeu și, în general, a „unui ce” care se află dincolo de natură și care „generează” universul etc. De domeniul filozofiei țin, de asemenea, problemele metodologiei și ale teoriei cunoașterii. Discutarea acestor probleme cu aplicare la astronomie sau cosmologie ca parte a acestora este cu totul firească și prezintă un interes evident.

Cînd ne întrebăm însă dacă spațiul este euclidian sau ne-euclidian, dacă volumul lui este finit sau infinit, dacă universul este staționar sau nestaționar sau care sînt legile de care ascultă mișcarea galaxiilor, toate aceste probleme țin de domeniul fizicii și al astronomiei, se bazează pe observație și experiență și se verifică cu ajutorul lor. Este evident că datele concrete ale științelor naturii infirmă direct legende biblice cu privire la „facerea lumii”, care în zilele noastre par pur și simplu povești pentru copii.

Într-una din enciclicele sale, papa Pius al XII-lea s-a referit la universul în expansiune, avînd, pare-se, intenția să consolideze în felul acesta, fie și indirect, valabilitatea legendelor biblice. De bună seamă că în literatura religioasă această tendință și-a găsit o dezvoltare ulterioară. Pe de altă parte, unii autori care se consideră reprezentanți ai materialismului au folosit mesajul papal și materialele similare pentru a dezvolta idei contrare: demonstrarea legăturii dintre teoria universului în expansiune și legendele biblice cu privire la crearea lumii.

Inconsistența ambelor tendințe este evidentă. De altfel, lucrul acesta îl înțeleg și mulți oameni credincioși. G. Lemaître, unul dintre cosmologii contemporani proeminenți, ale cărui lucrări au fost menționate mai sus, era abate; mai mult chiar, începînd din 1960 și pînă la moartea sa, care a survenit în 1966, a fost președinte al Academiei de Științe a Vaticanului (Academia Papală). Or, iată ce spunea Lemaître la al XI-lea Congres internațional Solvay, consacrat cosmologiei: „În măsura în care pot să apreciez, o asemenea teorie (este vorba de teoria universului în expansiune cu un așa-zis „început” — N. A.) se situează în întregime în afara oricăror probleme metafizice sau religioase. Ea lasă materialistului libertatea de a nega orice existență transcendentă. În ceea ce privește originea spațiului-timp, materialistul poate, de asemenea, să rămînă la aceleași opinii pe care le-a putut susține în cazul regiunilor nesingulare ale spațiului-timp”.

Personajele lui Ilf și Petrov ar fi fost în drept să spună, vorbind despre Lemaître: „Se vede că, de bine, de rău, abatele ăsta are ceva școală”, în sensul că are studii moderne și, dacă e vorba să-l combați, trebuie s-o faci de pe poziții temeinice, cu toate că este un „slujitor al cultului”. Idealismul filozofic și chiar religia nu se confundă în zilele noastre cu credințele în minuni și în facerea lumii, care au apărut în zorii civilizației.

Așadar, problemele cosmologice nu pot fi rezolvate pe baza unor opinii preconcepuate. Filozofia materialistă nu pune și nu poate pune un „tabu” asupra alegerii modelului de univers. În mod concret, problemele caracterului finit sau infinit al volumului universului, ale legilor evoluției lui în timp și altele asemănătoare trebuie rezolvate în lumina datelor observațiilor astronomice și ale fizicii moderne.

Problema cosmologică

„Problema problemelor” în cosmologie este problema evoluției universului în timp — în orice moment al timpului. Această problemă încă nu a fost soluționată, dar există și sînt în curs de dezbateră o serie de ipoteze în această privință.

Cosmologia și astronomia extragalactică, inseparabilă de ea, cuprind un cerc tot mai larg de probleme. De aceea este util să ne fixăm asupra unei „probleme a problemelor”. Putem considera ca atare problema cosmologică în accepția restrînsă a cuvîntului, respectiv punerea în lumină a trecutului universului nu în decursul unui anumit segment de timp, ci „pe ansamblu”. Este vorba de tipul însuși de comportare, de tabloul general (și nu de precizarea amănuntelor) care va continua la nesfîrșit. Unul din aspectele particulare ale problemei cosmologice în accepția menționată este, evident, și problema „originii” timpului, a sensului și caracterului acestei noțiuni. Întrucît problema cosmologică încă nu este rezolvată, nu putem decît să lămurim în principiu la ce soluții s-ar putea ajunge.

Prima soluție: universul s-a aflat în trecut într-o situație „singulară”, care constituie începutul timpului, noțiunea de timp „înainte” de această „origine” fiind lipsită de sens fizic, ba chiar de orice alt sens. Această din urmă afirmație apare ca necesară pentru varianta respectivă (de care țin toate modelele fridmaniene fără termenul Λ). Într-adevăr, dacă am putea vorbi despre timp „înainte” de începutul evoluției universului, deși universul nu a existat în această perioadă, ar trebui să admitem tocmai „facerea lumii”. Spațiul și timpul sînt inseparabile de materie, de aceea imposibilitatea de a introduce și de a folosi noțiunea de timp înainte de „origine” este absolut logică (dacă, bineînțeles, admitem însăși existența „originii”). În lumina celor spuse, apar ca necontradictorii ipoteza cu privire la caracterul finit al timpului în trecut și cea cu privire la conceperea „originii” timpului în modelele fridmaniene și în altele asemănătoare ca „singularitate”, în sensul de stare cu o densitate infinită.

Mulți cosmologi consideră o asemenea punere a problemei ca fiind în principiu satisfăcătoare. Alții, printre care și autorul prezentei lucrări, nu s-au declarat niciodată și nu se declară nici astăzi satisfăcuți de extrapolarea mecanică a modelelor fridmaniene asupra stării caracterizate printr-o densitate

infinită. Par mai firești fie modelele cu un timp infinit (vezi mai jos), fie fixarea unei regiuni în vecinătatea „originii” (punctul $t = 0$ în modelele fridmaniene), unde principial nu pot fi folosite concepțiile spațio-temporale cunoscute. Mai mult decât atât, chiar pe baza reprezentărilor fizice actuale se poate afirma că, în condițiile unei apropieri infinitezimale de „origine”, aplicarea, în general practică, a ecuațiilor teoriei relativității generalizate nu este justificată. În legătură cu aceasta este suficient să spunem că teoria relativității generalizate este construită fără a se ține seama de efectele cuantice. Or, efectele cuantice trebuie să se manifeste într-un fel atunci când mărimile tind către zero.

Se prea poate însă ca aceasta să se întâmple numai pentru distanțele $l_g \approx \sqrt{\frac{Gh}{c^3}} = 1,6 \cdot 10^{-33}$ cm și pentru timpul $t_g \approx \sqrt{\frac{Gh}{c^5}} = 0,6 \cdot 10^{-43}$ s (unde $h = 1,05 \cdot 10^{-27}$ erg·s este constanta cuantică, iar G și c sînt constanta gravitațională și viteza luminii). Notăm că momentului t_g îi corespunde densitatea $\rho_g \approx \frac{c^5}{hG^2} = 4 \cdot 10^{93}$ g/cm³. În această regiune și poate chiar într-una considerabil mai mare¹, noțiunile spațio-temporale obișnuite sînt evident necorespunzătoare sau cel puțin nevalabile. De aceea, a vorbi despre „singularitate” în înțelesul obișnuit (despre caracterul infinit al densității materiei) nu are, la drept vorbind, nici un sens.

De aici concluzia: noțiunea de „singularitate” pentru $t = 0$ și cea a „timpului finit” în trecut este cu mult mai complexă decât s-ar părea la prima vedere. Așadar, vecinătatea „originii” reclamă o examinare specială, iar afirmațiile cu privire la caracterul finit al timpului și densitatea infinită pentru $t = 0$

¹ Valorile indicate pentru l_g și t_g au următorul sens: pentru aceste valori și pentru valorile mai mici ale lui l și t , cîmpul gravitațional nu poate fi considerat în accepția clasică, adică fără a se ține seama de efectele cuantice. Nu este însă nici pe departe demonstrat că, în virtutea altor cauze nelegate cu gravitația, noțiunile spațio-temporale cunoscute nu devin inaplicabile pentru valori ale lui l și t cu mult mai mari decât l_g și t_g . Ajunge să spunem că în fizica particulelor elementare s-au putut realiza pînă astăzi numai distanțe de ordinul $l_0 \approx 10^{-15}$ cm și $t_0 = \frac{l_0}{c} = 3 \cdot 10^{-26}$ s (pentru valori ale lui l și t mai mari decât l_0 și t_0 mai rămîne aplicabilă teoria existentă).

au un caracter, într-adevăr, convențional. *Timpul în apropierea „originii” își pierde accepția cunoscută și deci nu putem vorbi despre caracterul lui finit sau infinit fără rezerve speciale*¹.

A doua posibilitate: în trecut, mărimea lui R (raza de curbură a universului) a atins o valoare minimă diferită de 0, iar densitatea materiei a atins, corespunzător cu aceasta, valoarea maximă. Pînă atunci, universul nu s-a dilatat, ci s-a contractat. Este evident că modelele de acest tip pot avea mai multe variante (fig. 16). Dacă nu vom introduce termenul Λ , în teoria relativității generalizate nu există în general soluții de acest gen. Ecuațiile cu termenul Λ , dacă vom atribui lui Λ valori arbitrare, au soluții de tipul reprezentat în figurile 16 a, b dar nu au soluții pulsatorii de tipul 16 c (este vorba de soluții $R(t)$, care nu ajung la zero, adică la puncte cu o densitate infinită).

Afară de aceasta, examinăm acum modele de univers omogen și izotrop; luarea în considerare a neomogenității și a caracterului neizotrop complică mult tabloul și de aceea este limitată aici numai la cîteva variante simple.

Dacă timpul este infinit, așa cum se presupune pentru cazul modelelor schematic reprezentate în figurile 16 a, b, c, apar anumite dificultăți. Caracterul lor depinde într-o măsură considerabilă de valoarea densității maxime care se obține prin contracție, dar, în general vorbind, ele sînt legate de posibilitatea „morții termice”, de acumularea neutrinilor etc.

Este oare timpul finit în trecut (inclusiv în accepția convențională menționată mai sus) sau infinit? Aceasta este întrebarea principală la care trebuie să răspundem pentru soluționarea problemei cosmologice. În continuare, trebuie să concretizăm și mai mult modelul universului. Astăzi, pe cît știm, nu se întrevăd căi pentru rezolvarea problemei, în afară de cazul cînd se va reuși să se descopere un maxim de

¹ Stările care implică o densitate infinită („singularitatea”) se obțin nu numai pentru modelele cosmologice, dar și în cazul unei contractări impetuoase (colaps) a unei sfere masive supuse gravitației (în acest caz este de o importanță substanțială ca sfera să nu aibă o mișcare de rotație și să fie lipsită de mișcări lăuntrice intense). De aici reiese clar că problema „singularităților” în soluțiile care se obțin în cadrul teoriei relativității generalizate poate fi cercetată nu numai pentru modelele universului, ci și în alte cazuri.

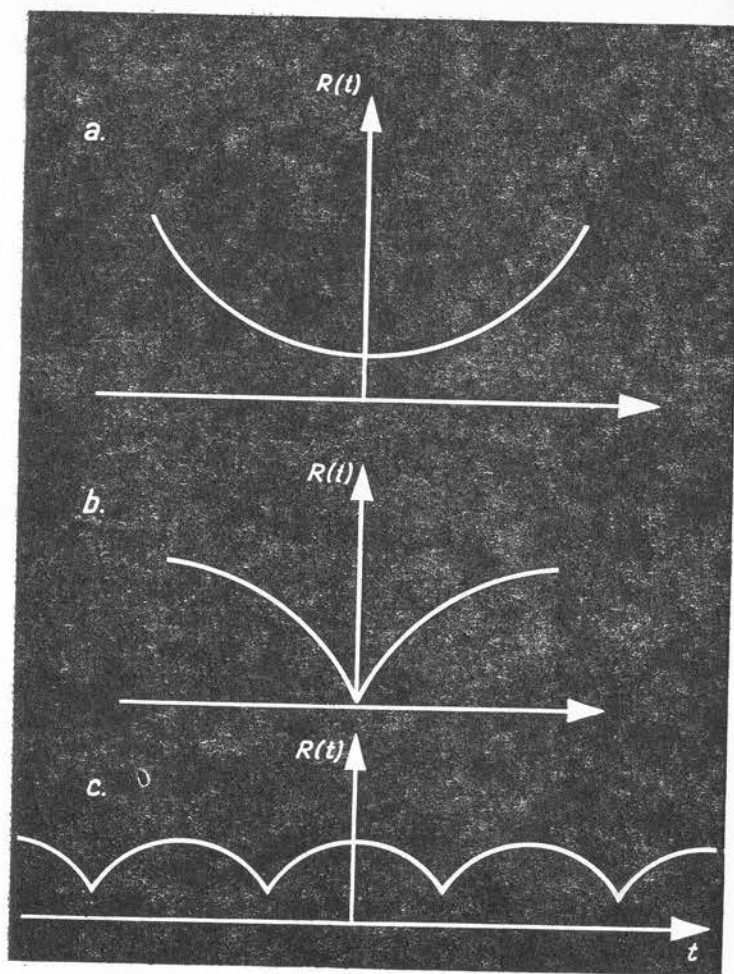


Fig. 16. — Modificarea în timp a razei de curbura și a distanțelor în modelele ipotetice cu timp infinit.

densitate chiar în regiunea relativ accesibilă a densităților mai mici decât $\rho_{\text{neutrino}} \approx 10^7 \text{ g/cm}^3$ ($t_{\text{neutrino}} \approx 0,3 \text{ s}$).

Pe plan teoretic, după cum ni se pare în momentul actual, modelele cele mai promițătoare sînt cele cu „singularitate”

în trecut, domeniul „singularității” fiind privit în lumina efectelor cuantice. În felul acesta, timpul în trecut apare nu atît ca finit, cît ca nedeterminat. Superioritatea acestor modele constă în faptul că ele sînt lipsite de dificultățile care ies la iveală în cazul modelelor cu timpul infinit. Este însă foarte posibil ca superioritatea menționată să fie iluzorie, întrucît caracterul efectelor cuantice în apropierea „singularității” (sau, ca să folosim din nou expresia pe care am utilizat-o mai des în prima parte a lucrării, în apropierea „originii”) este în general necunoscut și de aceea nu există nici o garanție că în această privință nu vor fi întîmpinate dificultăți serioase sau noi posibilități.

În a doua jumătate a anului 1969 a reieșit definitiv că asemenea posibilități noi există într-adevăr¹. E vorba de faptul că fizicienii sovietici V. A. Bielinski, E. P. Lifșit și I. M. Halatnikov, precum și americanul Ch. Miesner au găsit și studiază în cadrul teoriei relativității generalizate o clasă nouă de modele cosmologice. În aceste modele, în zona valorilor mici ale timpului t universul este sensibil anizotrop, iar atunci cînd universul se apropie de „singularitate”, respectiv de valoarea $t = 0$ parametrul oscilează cu repeziune în timp. În această zonă, într-un timp finit t (în intervalul dintre „originea” $t = 0$ și timpul t) numărul de oscilații (numărul de epoci și de cicluri) este infinit. Se pune astfel într-un fel nou problema sensului fizic al timpului în vecinătatea „singularității”: dacă măsurăm timpul cu numărul de cicluri, el este infinit. Afară de aceasta, după cum a subliniat Ch. Miesner, în modelele menționate efectele cuantice se pot dovedi neglijabile, chiar cînd t tinde către 0, afirmație în privința căreia avem însă îndoieli serioase. Așadar există modele cosmologice în care apare o „singularitate” cînd $t = 0$ (pentru $t = 0$ densitatea este infinită), timpul t este finit, dar un sens fizic mai cert are un alt timp, τ , de data aceasta infinit (de notat că acest timp infinit t , proporțional cu $|\log t|$, a fost introdus cu peste două decenii în urmă de către astronomul englez Milne.

Observațiile de mai sus sînt, bineînțeles, insuficiente pentru a ne face o idee asupra noilor modele cosmologice. Afară de aceasta, studiul acestor modele este astăzi în plină dezvoltare

¹ Ultima parte a acestui capitol a fost scrisă la sfîrșitul anului 1969.

și deocamdată foarte multe elemente mai rămân neclare. Dar chiar ceea ce s-a spus aici confirmă concluzia generală că problema „singularității” este complexă și prezintă numeroase aspecte, fiind legată de o analiză profundă a reprezentărilor spațio-temporale și în nici un caz nu poate fi rezolvată pe baza unor considerații apriorice.

Încheiere

Disponem de un singur „exemplar” al universului și, în plus, nu putem face experiențe cu el. Faptul acesta, precum și o serie de alte împrejurări, fac ca rezolvarea problemei cosmologice să fie deosebit de dificilă. S-ar putea chiar să se pară că este de-a dreptul imposibilă. Dar istoria științei, și în special istoria dezvoltării cosmologiei înseși, este, după mine, cel mai bun leac împotriva unor aprecieri pesimiste ale situației și împotriva neîncrederii în posibilitatea de a obține un răspuns chiar la cele mai grele probleme.

În decurs de cincizeci de ani — în numai cinci decenii —, cosmologia a parcurs o cale pe care predecesorii noștri nici nu și-ar fi putut-o închipui. Cine avea o idee acum cincizeci de ani despre radioastronomie și astronomia radiațiilor Roentgen, despre radiogalaxii, quasari, radiația termică remanentă și mai ales despre expansiunea universului, despre caracterul lui nestaționar?

Majoritatea cititorilor acestei lucrări vor avea, probabil, șansa să celebreze în anul 2017 a suta aniversare a cosmologiei moderne. Până atunci, unde și particulele ce ne parvin din lumi îndepărtate vor fi povestit, fără îndoială, oamenilor cu mult mai mult decât am reușit să înțelegem până astăzi.

Apendice

În lucrările de popularizare a științei destinate unui cerc mai larg de cititori se consideră drept regulă să nu se recurgă la formule matematice. Sint prohibite de obicei până și expresiile algebrice, fără să mai vorbim de operațiile de diferențiere și integrare.

Acest fel de a trata problemele este însă evident depășit în multe cazuri. Elevi din primele clase nu citesc, bineînțeles, lucrări de fizică și de astronomie. Cât despre cei din clasele superioare, cel puțin acea

parte a lor care manifestă interes pentru științele exacte nu se teme de formulele algebrice elementare, iar cei mai mulți dintre ei, încă înainte de absolvirea școlii, au cunoștințe de analiză matematică.

Este de prisos să mai vorbim de studenți, ingineri, tehnicieni și profesori — cei care formează cercul de cititori ai lucrărilor de fizică și astronomie popularizată. Dacă lucrurile stau astfel, de ce să căutăm cu tot dinadinsul să le explicăm cititorilor în cuvinte ceea ce poate fi notat și explicat mai concis și, în fond, mai exact și mai profund cu ajutorul unor formule matematice simple? Matematica nu este decît un limbaj special, creat și dezvoltat pentru exprimarea relațiilor cantitative. Bineînțeles, nu pledăm pentru folosirea unui aparat matematic prea complicat, ci pentru noțiunile simple care au intrat în uz de sute de ani și s-au încetățenit trainic în știință, ba chiar, se poate spune, au pătruns în viața noastră.

„În teorie”, toate acestea sînt posibile și nu vor stîrni obiecții prea mari. În practică însă, mulți autori ai studiilor și cărților de popularizare a științei îndură adevărate chinuri întrebîndu-se în ce limite pot face uz de matematică.

Nu există un răspuns universal-valabil la această întrebare. Răspunsul depinde de temă și de pretențiile noastre față de cititorul prezumtiv.

Prezenta lucrare este destinată unor cititori pe care nu-i vor speria formulele algebrice simple. Nu avem însă temeiul să credem că majoritatea cititorilor noștri cunosc ecuațiile diferențiale. De aceea a existat temerea ca nu cumva chiar simpla apariție în text a citorva ecuații diferențiale să creeze o impresie falsă despre nivelul acestei expunerii. Pe de altă parte însă, mulți cititori vor avea o senzație de nesatisfacție atunci cînd vor citi în text că există o anumită ecuație pe care trebuie s-o satisfacă potențialul φ și mai ales cînd vor afla despre termenul Λ și despre ecuațiile pentru cîmpul g_{ik} cu termenul Λ , fără însă să poată cunoaște aceste ecuații, care, fiind ocolite, par învăluite în mister.

Ținînd seama de cele de mai sus, autorul s-a gîndit la un compromis, încercînd să pună în lumină această problemă, cel puțin pe scurt, în prezentul apendice. Aceasta s-ar fi putut face și fără prealabile considerații despre rolul și locul matematicii în literatura de popularizare a științei. Am vrut însă să-l îndemnăm pe cititor să se gîndească și el la această problemă. Ce dorește oare cititorii în această privință? Nu se vor dovedi oare utile pentru mulți dintre ei niște completări matematice amplasate la sfîrșitul broșurii și scrise fără limitări prea rigide în ceea ce privește caracterul accesibil al expresiilor matematice?

Și acum să ne referim la ecuațiile despre care a fost vorba în textul lucrării.

În teoria gravitației universale a lui Newton, cîmpul gravitațional este descris de potențialul φ , care satisface următoarea ecuație diferențială:

$$\Delta\varphi = \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2} = 4\pi G\rho. \quad (1)$$

Aici $\rho(x, y, z)$ este densitatea masei (respectiv masa unității de volum), iar G este constanta gravitației, egală cu $6,670 \cdot 10^{-8} \frac{\text{cm}^3}{\text{gs}^2}$.

Ecuatia de tipul (1) se numește *ecuația lui Poisson*, o ecuație diferențială cu derivate parțiale în raport cu x, y și z . Dacă distribuția maselor care creează potențialul φ posedă o oarecare simetrie, ecuația (1) se simplifică.

Să presupunem, de exemplu, că, în cazul nostru, cîmpul gravitațional este creat de un corp sferic în repaus, a cărui densitate este constantă (cu alte cuvinte, densitatea ρ este constantă înăuntrul sferei cu raza r_0 și egală cu 0 în afara sferei). În acest caz cîmpul gravitațional posedă o simetrie sferică, adică φ depinde numai de distanța de la punctul de observație pînă la centrul sferei $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$. Ecuatia (1) capătă forma

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d\varphi}{dr} \right) = \frac{d^2\varphi}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d\varphi}{dr} = 4\pi G\rho. \quad (2)$$

În afara sferei (cînd $r \geq r_0$), soluția ecuației (2) este cea de mai jos:

$$\varphi = -\frac{Gm_1}{r}, \text{ unde } m_1 = \frac{4\pi}{3} \rho r_0^3 \text{ este masa sferei.} \quad (3)$$

Remarcăm că ecuația (2) și soluția (3) sînt valabile și în cazul cînd densitatea ρ nu este constantă, că depinde numai de distanța r , respectiv cînd $\rho = \rho(r)$.

Dacă în cîmpul masei m_1 se găsește o altă masă m_2 , asupra ei acționează forța gravitațională

$$\vec{F} = -m_2 \nabla \varphi = -\frac{Gm_1 m_2}{r^3} \vec{r}.$$

Aici, $\nabla \varphi = \text{grad } \varphi$ este un vector avînd componentele: $\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \frac{\partial \varphi}{\partial y}$ și $\frac{\partial \varphi}{\partial z}$, după axele x, y, z . Dacă φ depinde numai de r , avem $\nabla \varphi =$

$= \frac{\partial \varphi}{\partial r} \vec{r}$, unde $\vec{r}$ este raza vectorie îndreptată de la centrul masei $M(m_1)$ spre punctul considerat. Ecuatia (1) și relația menționată

dintre forța gravitațională $\vec{F}$ și potențialul φ permit în cadrul teoriei lui Newton să se determine forța gravitațională pentru orice distribuție dată a maselor.

Dacă spațiul euclidian infinit este umplut uniform cu mase avînd densitatea ρ_0 , ecuațiile (1) sau (2) nu au nici o soluție cu sens fizic.

De exemplu, ecuația (2) are în acest caz soluția $\varphi = \frac{2\pi}{3} G\rho_0 r^2$, care

crește nelimitat atunci cînd crește r . Tocmai această dificultate legată de modelul cosmologic S.O.E. l-a îndemnat pe Seeliger să încerce să înlocuiască ecuația lui Poisson (1) cu următoarea ecuație:

$$\Delta \varphi' - \lambda \varphi' = 4\pi G\rho. \quad (4)$$

În acest caz, în afara sferei cu masa $m_1 = \frac{4\pi}{3} \rho r_0^3$, potențialul

$$\varphi' = -\frac{Gm_1}{r} e^{-\sqrt{\lambda}r} \text{ sau, așa cum am scris în text, } \varphi' = -\frac{Gm_1}{r} e^{-r/R},$$

$R = \frac{1}{\sqrt{\lambda}}$. În cazul unei valori suficient de mici a lui λ , adică în cazul

unui R suficient de mare, diferența dintre potențialele φ și φ' poate să fie făcută oricît de mică vrem pentru orice valoare finită a lui r . Totodată, pentru un spațiu infinit umplut uniform cu o substanță avînd densitatea ρ_0 , ecuația (4) are o soluție perfect semnificativă $\varphi' = -\frac{4\pi G\rho_0}{\lambda}$.

În lucrarea sa din 1917, menționată la începutul acestui studiu, Einstein își începe expunerea prin discutarea dificultăților teoriei gravitației a lui Newton și a posibilității de a evita într-o anumită măsură aceste greutăți prin folosirea ecuației (4) pentru φ' în locul ecuației lui Poisson (1)¹. Einstein a remarcat însă de la început că această cale „nu trebuie acceptată în mod serios, deoarece ea e utilă numai pentru clarificarea raționamentelor ulterioare”.

Această concluzie este lesne de înțeles: atît teoria gravitației a lui Newton, respectiv ecuația (1), cît și generalizarea ei, reflectată în ecuația (4), nu satisfac cerințele teoriei relativității. Faptul acesta a mai fost menționat în textul lucrării noastre, unde am subliniat că în teoria relativistă forțele gravitaționale nu se pot propaga cu o viteză mai mare decît viteza luminii. Or, în teoria lui Newton se consideră de fapt că forțele gravitaționale se propagă cu o viteză infinită.

În teoria relativistă scalară a gravitației, ca și în teoria newtoniană a gravitației, cîmpul gravitațional este descris de funcția scalară φ , acesta avînd aceeași valoare în toate sistemele de referință. Numai că acest potențial φ nu satisface ecuația lui Poisson (1), ci o ecuație mai complicată, care — în exteriorul maselor — are următorul aspect (ecuația lui d'Alembert):

$$\square \varphi \equiv \Delta \varphi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0. \quad (5)$$

Dacă corpurile care creează cîmpul gravitațional se deplasează încet (cu viteze v mult mai mici decît viteza luminii c), termenul $\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}$ din ecuația (5) este de obicei foarte mic și potențialul φ

¹ Einstein a ajuns atunci la această concluzie fără să cunoască lucrarea lui Seeliger, care a propus cu mult mai înainte adoptarea ecuației (4) pentru potențialul gravitațional.

se supune cu o bună aproximație ecuației $\Delta\varphi = 0$, ca și în teoria gravitației a lui Newton pentru exteriorul maselor gravitaționale (adică într-un domeniu unde în ecuația (1) putem spune $\rho = 0$; pentru simplitate nu vom scrie aici ecuația de tipul (5) pentru $\rho \neq 0$).

Teoria relativității generalizate a lui Einstein este teoria relativistă a cîmpului gravitațional, acest cîmp fiind descris de tensorul metric g_{ik} . Motivele care l-au făcut pe Einstein să caute tocmai ecuațiile lui g_{ik} și nu pe cele ale mărimii scalare φ au fost arătate în esență în textul lucrării: ele sînt legate de principiul echivalenței. Ecuațiile pentru g_{ik} , stabilite definitiv de Einstein în 1915, se transcriu de obicei într-o formă intrucitva simbolică:

$$R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ik}. \quad (6)$$

Aici, R_{ik} și R sînt niște expresii destul de complicate, care conțin mărimea g_{ik} și diversele ei derivate: $\frac{\partial^2 g_{ik}}{\partial x_l \partial x_m}$ și $\frac{\partial g_{ik}}{\partial x_l}$. De notat

că derivatele de ordinul al doilea $\frac{\partial^2 g_{ik}}{\partial x_l \partial x_m}$ intră în ecuațiile lui Einstein (6) în mod liniar, așa încît membrul întii al ecuațiilor amintește totuși ecuația lui d'Alembert (5).

În membrul al doilea al ecuației (6) figurează tensorul energie-impuls T_{ik} , care caracterizează proprietățile materiei și de aceea figurează în mod firesc ca sursă a cîmpului g_{ik} . În această privință, tensorul T_{ik} este cu totul analog densității ρ din ecuația (1) a lui Poisson. În cazul unui cîmp gravitațional destul de slab, rolul esențial îi revine unei singure componente a tensorului g_{ik} , și anume componente g_{00} , care poate fi notată sub forma $g_{00} = 1 + \frac{2\varphi}{c^2}$. Menționăm că mărimea este echivalentă potențialului gravitațional al lui Newton și verifică ecuația (1).

Ecuațiile lui Einstein (6) se reduc în mod automat în condițiile examinate la ecuația (1), deoarece tensorul T_{ik} are o singură componentă mare $T_{00} = \rho c^2$, proporțională cu densitatea ρ (celelalte componente T_{ik} sînt mici în raport cu T_{00}).

Termenul Λ , introdus de Einstein în 1917, se adaugă la ecuațiile (6), care capătă astfel următoarea formă:

$$R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R - \Lambda g_{ik} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ik}. \quad (7)$$

Adăugarea termenului Λ este singura generalizare a ecuațiilor (6) nelegată de introducerea unor derivate superioare ale lui g_{ik} în raport cu coordonatele x_l și care nu încalcă principiile generale ale teoriei. Adăugarea termenului Λ în ecuațiile (6) este, în linii mari, analogă trecerii de la ecuația (1) la ecuația (4) în urma adăugării termenului $-\lambda\varphi'$.

Dacă în ecuațiile (7) vom trece termenul $-\Lambda g_{ik}$ în membrul al doilea, acest termen va constitui un fel de adaos la tensorul T_{ik} și

poate fi interpretat ca o sursă suplimentară a cîmpului gravitațional. Cu alte cuvinte, acum acest cîmp este creat nu numai de materie (tensorul T_{ik}), ci și de termenul de „vid“ Λg_{ik} , prezent oriunde și oricînd. Dacă „constanta cosmologică“ Λ este pozitivă, acțiunea termenului Λ este echivalentă cu o respingere, care se opune atracției gravitaționale determinate de tensorul T_{ik} .

Au făcut oare toate aceste lămuriri ca tezele expuse în textul lucrării să devină cu mult mai inteligibile? Autorul nu-și face iluzii în această privință. Nici un fel de completare rezumativă nu poate, bineînțeles, să înlocuiască manualele și să clarifice cu adevărat niște probleme destul de complexe. Putem spera doar că observațiile expuse îl vor ajuta pe student sau pe inginer, căruia și fără aceasta îi este cunoscută ecuația lui Poisson, să înțeleagă mai bine despre ce este vorba, că ele vor genera anumite asociații și poate că-l vor îndemna să caute cărți în care aceste probleme sînt tratate mai pe larg.

Introducere

Care sînt principalele elemente sau componente din care este alcătuit universul? Nu știu dacă această întrebare figurează în vreo anchetă pentru cercetarea curentelor de opinie în rîndurile celor care se ocupă cu astronomia. Sînt sigur însă că numai cu 15–20 de ani în urmă în răspunsurile date la o asemenea întrebare ar fi figurat doar stelele, gazul interstelar și intergalactic, planetele și pulberea, și alături de ele radiația electromagnetică și în primul rînd lumina. Nimeni nu ar fi menționat, probabil, radiația cosmică. Astăzi situația s-a schimbat radical și nemenționarea radiației cosmice printre componentele principale ale universului ar putea fi considerată drept dovadă a insuficienței cunoașterii a actualei stări a astrofizicii.

Ce-i drept, faptul că din cosmos ne parvine o radiație penetrantă, denumită radiație cosmică, a fost stabilit încă cu 50 de ani în urmă. Totuși, pînă în 1953 nu au fost cunoscute și înțelese două fapte hotărîtoare care ne permit să vorbim astăzi despre această radiație ca despre o componentă deosebit de importantă a universului. În primul rînd, s-a constatat că radiația cosmică este un fenomen universal, în sensul că ea este produsă și în Soare, și în stele, și atunci cînd erup supra-novele, și în radiogalaxii, și în quasari, într-un cuvînt, pretutindeni în cosmos. De aceea, studiul radiației cosmice (al particulelor încărcate rapide), recepționarea radiației electromagne-

tice generate de radiația cosmică departe de Pămînt, constituie unele din cele mai importante surse de informație în astronomie. În al doilea rînd, într-o serie de cazuri acțiunea radiației cosmice este un factor energetic și dinamic substanțial sau chiar determinant. De pildă, în sistemul nostru stelar — Galaxia — densitatea energiei radiației cosmice w_{rc} este de ordinul $1 \text{ eV/cm}^3 \approx 10^{-12} \text{ erg/cm}^3$. Presiunea radiației cosmice, care la o depărtare mare de Pămînt se prezintă ca un gaz alcătuit din particule relativiste cu viteze izotrop distribuite, este egală cu $1/3$ din energia lor, adică $p_{rc} = w_{rc}/3 \approx 10^{-12} \text{ dine/cm}^2$ (factorul $1/3$ are o semnificație minoră atunci cînd e vorba de aprecierea ordinului de mărime. Afară de aceasta, este foarte probabil că în spațiul interstelar $w_{rc} \approx (3...5) \cdot 10^{-12} \text{ erg/cm}^3$). În același timp densitatea energiei cîmpului magnetic din Galaxie $w_H = \frac{H^2}{8\pi}$ este tot de ordinul a $10^{-12} \text{ erg/cm}^3$, deoarece

intensitatea cîmpului magnetic $H \approx (1...10) \cdot 10^{-6} \text{ Oe}$.

În sfîrșit, densitatea energiei cinetice a mișcării termice a gazului intergalactic $\frac{3}{2} nkT$ este mai mică sau de ordinul de mărime al densității w_{rc} ($k = 1,38 \cdot 10^{-16} \text{ erg/grad}$ este constanta lui Boltzmann, iar n este concentrarea particulelor într-un gaz cu temperatura absolută T). În Galaxie, în apropierea planului de concentrație maximă, $n \approx 0,1...10$, sau în medie $n \approx 1$, iar $T \approx 100^\circ \text{K}$ pentru zonele neionizate și $T \approx 10^4^\circ \text{K}$ pentru zonele ionizate din apropierea stelelor fierbinți. De aici se vede marel rol al radiației cosmice pentru energetica și dinamica gazului interstelar.

Menționăm că acest rol este mare în special în regiunile periferice rarefiate ale Galaxiei, ținînd seama și de forța fundamentală care acționează în cosmos — forța gravitației. Așadar, forțele gravitației și forța de presiune obișnuită a gazului, care joacă un rol deosebit în stele, și-au pierdut situația de monopol în astronomie: într-o serie de cazuri presiunea radiației cosmice și forța cîmpului magnetic se dovedesc tot atît de mari sau chiar mai mari. La această concluzie ne duce nu numai și nu atît exemplul menționat al gazului interstelar, ci și examinarea unor procese ca erupțiile solare, apariția supernovelor și exploziile nucleelor galactice (acestea din urmă aflîndu-se probabil la originea formării radiogalaxiilor). În asemenea condiții se produc atît de multe radiații cosmice, într-o

cantitate atât de mare, încât ele pot determina într-o măsură considerabilă întreaga imagine a fenomenului.

Așadar, radiația cosmică ocupă astăzi un loc important în astronomie și este util ca domeniul cercetării ei să fie definit în mod convențional, ca un capitol special: astrofizica radiației cosmice.

De acest capitol țin, între altele:

studiul radiației cosmice pe Pământ și în imediata lui vecinătate (componența, spectrul energetic, anizotropia intensității);

informațiile privind radiația cosmică din univers (din Galaxie în ansamblul ei și din diversele ei regiuni, între altele din anvelopele supranovelor, din alte galaxii, radiogalaxii și quasari). Aceste informații se pot obține prin metodele radioastronomiei, astronomiei optice, astronomiei Roentgen, astronomiei gamma și astronomiei neutrinelor;

problema originii radiației cosmice în diversele ei aspecte (mecanismele de accelerare a radiației cosmice, analiza originii radiațiilor cosmice observabile pe Pământ).

Această listă ar putea fi lesne prelungită. Astfel, o direcție care cunoaște o amplă dezvoltare este cercetarea radiației cosmice solare, precum și a influenței sistemului solar asupra radiațiilor cosmice provenind din Galaxie. Alte direcții strâns legate de astrofizica radiației cosmice sînt radioastronomia, studiul centurilor de radiații ale Pământului și ale planetelor și astronomia Roentgen, gamma și neutrino.

Ar fi greu și inutil să delimităm precis aceste capitole. Limitele lor sînt determinate, în mod variabil de la un moment la altul, de un mare număr de factori, între altele de sfera de interese a diverșilor fizicieni și astronomi, de metodele de măsurare etc.

Menționăm pentru exemplificare că la conferința internațională pentru radiația cosmică ținută în iunie 1967 la Calgary, în Canada, s-a acordat o mare atenție astronomiei Roentgen și gamma, pe cînd centurile de radiații din jurul Pământului au fost cu totul excluse din cercul de probleme examinat, fiind lăsate oarecum în seama geofizicienilor.

În prezentul articol autorul nu-și propune să cuprindă un mare număr de probleme, ci dorește să-și concentreze atenția asupra studiului radiației cosmice care ajunge pînă în apropierea Pământului, asupra informațiilor privind radiația cosmică din Galaxie și metagalaxie și, în sfîrșit, asupra problemei

originii radiației cosmice. Notăm că în mod tradițional prin „problema originii radiației cosmice” se înțelege de obicei întregul domeniu pe care l-am denumit mai sus „astrofizica radiației cosmice”. Este însă incontestabil că problema originii radiației cosmice în sens propriu sau, dacă vreți, îngust reprezintă doar o parte a problemei generale.

Radiația cosmică din vecinătatea Pământului

Cîteva definiții. Pentru a evita unele neînțelegeri va trebui să începem cu cîteva definiții. Vom numi *radiație cosmică* numai fluxul de particule încărcate. Așadar, deși radiațiile gamma și neutrinii posedă o mare energie și sînt de origine cosmică, nu le vom considera și nu le vom numi componente ale radiației cosmice așa cum fac unii. Mai departe. Nu există, după cîte știm, nici o convenție general acceptată cu privire la nivelul de energie a particulelor începînd de la care fluxurile lor să fie considerate radiații cosmice. Vom considera deci, în mod cu totul convențional, nivelul energetic de 100 MeV ca o asemenea limită inferioară. Fluxurile de particule cu energie cinetică mai mică, dar care depășesc totuși simțitor energia mișcării termice, le vom numi *radiații subcosmice*.

În sfîrșit, ne va interesa numai radiația cosmică primară care poate fi observată dincolo de atmosfera terestră. Cît despre influența cîmpului magnetic terestru, o vom considera exclusă. Aceasta se poate realiza fie făcînd măsurătorile pe rachete interplanetare și sonde la distanțe mai mari decît aproximativ 10—15 raze terestre, fie, așa cum se și face de obicei în practică, luînd în considerare acțiunea cîmpului terestru cu ajutorul calculelor și al unor măsurători speciale.

Dacă observațiile se efectuează de pe sateliți și rachete, efectele atmosferei, în general vorbind, pot fi neglijate. Este incontestabil că viitorul aparține tocmăi unor asemenea măsurători. Dar pînă în prezent, fără să mai vorbim de trecut, sateliților și rachetelor le fac cu succes concurență baloanele de altitudine, cu ajutorul cărora aparatele se înalță la 40 km și mai mult, așa încît deasupra lor mai rămîne un strat de aer cu o masă care

nu depășește câteva grame pe centimetru pătrat, uneori chiar 1—2 g/cm². În asemenea condiții, când masa stratului de aer de deasupra reprezintă doar o fracțiune de procent din masa întregii atmosfere (care este egală cu aproximativ 1 000 g/cm²), radiația cosmică recepționată poate fi considerată primară; se pot introduce, de asemenea, corecții calculate cu o precizie suficient de mare, care să permită obținerea unor date destul de sigure despre radiația primară.

Una dintre metodele cele mai perfecte și fecunde de studiere a radiației cosmice s-a dovedit a fi folosirea emulsiilor fotografice. Dar emulsiile trebuie „salvate”, și majoritatea sateliților nu asigură recuperarea nici măcar a unei părți din aparatura lor pe Pământ. Iată unul dintre motivele pentru care baloanele de altitudine continuă să fie folosite pe scară largă.

Principalul parametru care caracterizează radiația cosmică este intensitatea fiecărui tip de particulă. Prin definiție se numește *intensitate* numărul de particule care trec într-o unitate de timp printr-o arie egală cu unitatea (în direcții apropiate de normala la această suprafață elementară) și raportat la un unghi solid unitate. Dacă particulele sînt repartizate izotrop, fluxul particulelor care trec printr-o suprafață unitate din emisfera direcțiilor este egal cu $F = \pi I = 3,14 I$. Intensitatea se măsoară de obicei în unități care se notează *particulă/cm²·s·steradian* sau *particulă/m²·s·steradian*. Mai exact, aceasta se referă la intensitatea totală (integrală) $I(>E)$ a particulelor cu o energie mai mare decît o anumită energie E . Se folosește de asemenea pe scară largă intensitatea diferențială $I(E)$ în așa fel definită încît $I(E) \Delta E$ este intensitatea particulelor cu o energie E care variază în intervalul ΔE . Dacă intensitatea $I(E)$ se măsoară, de pildă, în unități *particulă/m²·s·sterad·GeV*, aceasta înseamnă că $I(E)$ este numeric egală cu intensitatea $I(E) \Delta E$ pentru intervalul $\Delta E = 1 \text{ GeV}^* = 10^9 \text{ eV}$.

Anticipînd, menționăm că în afara zonei de acțiune a cîmpului magnetic terestru radiația cosmică e în mare măsură izotropă. De aceea, cu o aproximație foarte bună se poate spune că intensitatea I nu depinde de direcție, ci numai de energia particulei E (folosim energia totală $E = Mc^2 + E_c$, unde E_c

* GeV înseamnă gigaelectronvolt, adică 1 miliard de electronvolți (N. T.).

este energia cinetică, iar Mc^2 — energia de repaus a particulei cu masă M).

După cum rezultă din cele arătate, problema studiului radiației cosmice în vecinătatea Pământului se reduce la determinarea intensității $I(E)$ pentru particulele de toate tipurile. Practic această problemă generală se divide în câteva probleme particulare. Astfel, avînd aceeași energie E sau aceeași energie pe un nucleon $\varepsilon = E/A$ (A fiind masa atomică, sau mai exact numărul de masă al nucleului), se determină componența chimică a radiației cosmice sau raportul intensităților pentru nucleele diverselor elemente, iar uneori și al diversilor izotopi. În continuare se determină dependența intensității diverselor componente sau a radiației cosmice integrale în funcție de energia E sau de energia pe un nucleon ε . În asemenea cazuri vorbim de determinarea spectrului energetic. Separat se examinează problema intensității componente de electroni și pozitroni a radiației cosmice.

Componența chimică. În radiația cosmică particulele cele mai frecvente sînt protonii; cu oarecare aproximație intensitatea lor reprezintă 90% din intensitatea totală a radiației cosmice. Urmează apoi nucleele de heliu (particulele α) și, în sfîrșit, aproximativ 1% din intensitate revine tuturor celorlalte nuclee. Cifre mai complete se pot indica numai dacă se concretizează domeniul de variație al energiei pe care îl studiem. Pentru protonii și nucleele cu o energie totală mai mare de 2,5 GeV/nucleon (bineînțeles pentru protoni aceasta înseamnă că energia totală a particulei depășește cifra respectivă de 2,5 GeV) componența chimică a radiațiilor cosmice rezultă din tabelul 1. În primele două coloane ale acestui tabel sînt indicate grupurile de nuclee și numărul atomic al elementelor cărora le corespunde (de pildă, în grupul VH intră toate nucleele cu $Z \geq 20$). O asemenea împărțire pe grupuri este determinată de faptul că nu avem încă date despre fiecare element.

Un prim fapt izbitor este că în natură există în medie o cantitate foarte mică de nuclee, adică nuclee de litiu, beriliu și bor; în radiația cosmică însă nucleele din grupul L se află cam în același număr ca și nucleele din grupul H, respectiv ca toate nucleele cu numărul atomic $Z \geq 10$. Avem de-a face aici cu un efect de estimare, răspîndirea relativă a nucleelelor L în radiația cosmică este de 100 000 de ori mai mare decît răspîndirea lor

Tabelul 1

Răspîndirea elementelor în radiația cosmică și în medie în univers

Grupul de nuclee	Numărul atomic Z	Intensitatea particulelor* cu o energie de 2,5 GeV/nucleon	Răspîndirea în raport cu nucleele din grupul H	
			în razele cosmice	în medie în univers
p	1	1 300	650	3 000—7 000
α	2	94	47	250—1 000
L	3—5	2,0	1	10^{-5}
M	6—9	6,7	3,3	2,5—10
H	≥ 10	2,0	1	1
VH	≥ 20	0,5	0,6	0,05
VVH	≥ 30	$\sim 10^{-4}$	$\sim 10^{-4}$	$\sim 10^{-4}$

* În unități particulă/m² · s · steradian

medie în univers (în Soare, stele etc.). Nucleele L nu constituie o excepție: în radiația cosmică există în cantități relativ mari și alte nuclee slab răspîndite în natură. Astfel, în natură conținutul de ^3He (izotop al heliului) reprezintă aproximativ 0,03% din proporția izotopului de ^4He (nucleul de ^4He constă din doi protoni și doi neutroni, în timp ce în nucleul de ^3He sînt doi protoni și un singur neutron). În radiația cosmică însă raportul $^3\text{He}/(^3\text{He} + ^4\text{He})$ reprezintă o mărime de ordinul a 10%. În domeniul de energii $\varepsilon \geq 2,5$ GeV/nucleon acest raport nu a fost încă măsurat; în domeniul $\varepsilon = 80 \dots 360$ MeV/nucleon raportul $^3\text{He}/(^3\text{He} + ^4\text{He}) = (0,1 \dots 0,2)$.

Cum se explică această caracteristică deosebit de importantă a componenței chimice a radiației cosmice? Logica indică două posibilități. Prima constă în presupunerea că în sursele de radiație cosmică componența chimică este cu totul diferită de cea medie a universului. Dar posibilitatea de îmbogățire a surselor cu elemente și izotopi rari de sute de mii de ori pare foarte puțin probabilă. De aceea (cît și din alte cauze) este cu mult mai probabilă a doua posibilitate: elementele și izotopii rari se formează în gazul interstelar în timpul călătoriei radiațiilor cosmice de la sursele lor pînă la Pămînt.

Transformarea componenței chimice a radiației cosmice în timpul rătăcirii lor prin mediul interstelar este inevitabilă.

Într-adevăr, nucleele care intră în componența radiației cosmice trebuie să se întâlnească cu nucleele elementelor care intră în componența mediului interstelar (această componență este aproximativ aceeași ca și cea medie a universului; vezi tabelul 1). În urma multor asemenea ciocniri au loc reacții nucleare și nucleele mai grele se scindează în grupuri de nuclee mai ușoare, cuprinzînd și protoni (se formează cu această ocazie și neutroni, care sînt însă instabili și se transformă destul de repede în protoni, eliberînd un electron și un neutrino).

Probabilitatea diverselor transformări nucleare este cunoscută mai mult sau mai puțin exact sau în orice caz poate fi măsurată cu ajutorul acceleratoarelor. Fiind cunoscute aceste probabilități și avînd în vedere că în sursele de radiație practic nu există nuclee L , se pune întrebarea: care este „grosimea” x a stratului de substanță pe care trebuie să-l străbată radiația cosmică pentru a se putea observa în componența ei atîtea nuclee L cîte se observă în realitate? Rezultă că, în limitele preciziei realizate, pentru aceasta este suficientă o „grosime” a stratului de gaz interstelar $x = 3$ g/cm². O bună verificare ar putea fi determinarea densității superficiale a acestui strat x după datele privind cantitatea izotopului ^3He în radiație cosmică, cît și cantitatea unei serii de alte elemente rare și izotopi.

Din păcate, nu dispunem încă astăzi de toate informațiile necesare (intensitatea în domeniul energiilor relativiste, probabilitatea fragmentării) pentru efectuarea acestei verificări cu suficientă certitudine. Afară de aceasta, după toate probabilitățile, nu poate fi vorba de o „grosime” x egală pentru toate particulele radiațiilor cosmice, ci de o valoare medie oarecare. În cadrul diverselor modele privind originea radiației cosmice și al diverselor ipoteze, această valoare medie nu este aceeași. Nu trebuie să uităm, de asemenea, că pe măsura creșterii grosimii x se modifică tot mai mult nu numai cantitatea de nuclee rare, ci și întreaga componență chimică a radiației cosmice.

Studiul acestei componențe într-un diapazon mare de energii este o problemă mare și interesantă, care oferă o mulțime de posibilități.

¹ Din punct de vedere fizic această „grosime” este de fapt o „densitate superficială” ($N \cdot T$).

În ultimii ani grupurile de fizicieni care lucrează cu dispozitive instalate pe sateliți (în special cei de la Universitatea din Chicago și de la Centrul de zboruri cosmice Goddard) au obținut mari succese în studierea componenței chimice a radiației cosmice cu energii mici. Mai există însă în acest domeniu multe elemente neclare, în bună parte din cauză că în domeniul energiilor mici (energia cinetică $\varepsilon_c < 1$ GeV/nucleon și mai ales $\varepsilon_c < 10$ MeV/nucleon) rezultatele sînt puternic influențate de activitatea Soarelui și de perturbațiile plasmei interplanetare determinate de această activitate. În domeniul particulelor relativiste ($\varepsilon_c > 1$ GeV/nucleon) situația este mai simplă, dar există alte greutăți (de pildă, nu este ușor să se distingă izotopii unui element dat). Progresul realizat aici în ultimul timp (în special pe baza lansării de baloane de altitudine) este incontestabil.

După părerea mea — care nu este împărtășită de toți oamenii de știință —, datele existente astăzi privind structura chimică a radiației cosmice cel puțin nu contravin ipotezei că radiația cosmică parcurge în medie un strat de grosime $x = 2 \dots 4$ g/cm³ și că componența chimică a surselor este mai mult sau mai puțin obișnuită (bunăoară, că raportul dintre numărul de nuclee L și numărul de nuclee H în surse este de un ordin de mărime cu mult mai mic decît în cazul razelor cosmice).

Grosimea stratului de substanță străbătut cu o viteză v este egală cu $x = v \rho T$, unde ρ este densitatea medie a gazului străbătut de particulă, iar T — timpul peregrinărilor ei (a nu se confunda cu notația temperaturii, la care s-a recurs mai sus). Pentru particulele relativiste viteza v este practic egală cu viteza luminii $c = 3 \cdot 10^{10}$ cm/s, dar și în acest caz cunoscînd x putem determina numai produsul ρT .

Dacă radiațiile cosmice observate în apropierea Pămîntului s-au format în Galaxia noastră și o umplu — inclusiv haloul galactic (vezi mai jos) — mai mult sau mai puțin uniform, densitatea medie ρ este egală cu aproximativ $2 \cdot 10^{-26}$ g/cm³. Concentrarea medie a gazului $n \approx 10^{-2}$ cm⁻³, iar masa medie a atomilor de gaz interstelar $M \approx 2 \cdot 10^{-24}$ g). De aici rezultă că durata peregrinărilor sau, cum se spune de obicei, durata vieții radiației cosmice este

$$T = \frac{3}{3 \cdot 10^{10} \cdot 2 \cdot 10^{-26}} = 5 \cdot 10^{15} \text{ s} \approx 2 \cdot 10^8 \text{ ani.}$$

Ar fi de dorit, desigur, să determinăm timpul T direct. În principiu, aceasta se poate face studiind componența chimică a radiației cosmice. Astfel, printre alți izotopi ai beriliului, în timpul reacțiilor nucleare se formează un izotop ¹⁰Be radioactiv care se dezintegrează transformîndu-se în ¹⁰B; durata medie a vieții izotopului ¹⁰Be este $T_{Be} = 4 \cdot 10^6 (E/Mc^2)$ ani (unde E este energia totală, iar M — masa de repaus a nucleului ¹⁰Be; apariția factorului E/Mc^2 reflectă efectul încetînirii relativiste a timpului pentru un „orologiu“ în mișcare). Este clar că abundența izotopică a ¹⁰Be în radiațiile cosmice depinde de durata vieții acestora T . De pildă, dacă radiația cosmică s-ar fi format foarte recent ($T \ll T_{Be}$), atunci izotopul ¹⁰Be ar fi prezent într-o cantitate relativ mare în componența ei, deoarece el nu ar fi avut timp să se dezintegreze. Din păcate, în prezent datele esențiale pentru aflarea vîrstei izotopilor de Be observați sînt încă insuficient de precise. Rezolvarea acestei probleme va fi însă posibilă în următorii ani¹.

Exemplul cu ¹⁰Be este, desigur, doar unul dintre multe cazuri în principiu posibile. Un interes deosebit prezintă elementele transuraniene. Este vorba de 2 sau 3 izotopi ai plutoniului și ai curiului care se dezintegrează numai în decurs de zeci de milioane de ani. Dacă acești izotopi ar putea fi găsiți în radiațiile cosmice, am obține informații despre distanța pînă la sursele lor (plutoniul și curiul se pot practic forma numai ca urmare a captării de neutroni de către elemente mai ușoare în inși sursele de radiație).

Ținînd seama de datele cu privire la componența radiației cosmice în vecinătatea Pămîntului (vezi tabelul 1) și de modificarea acestei componențe în mediul interstelar, putem presupune de asemenea că radiațiile cosmice din surse sînt într-o măsură îmbogățite în elemente mai grele și sărăcite de protoni și particule. Aceasta pune în evidență, probabil, componența chimică specifică a surselor (sărăcia în hidrogen și heliu), cît și eficacitatea mai mare a accelerării nucleelor grele în comparație cu nucleele mai ușoare.

Spectrul energetic. În domeniul energiilor mai mici ($\varepsilon_c \leq 1$ GeV/nucleon), intensitatea radiației cosmice scade con-

¹ După rezultatele preliminare comunicate la conferința pentru radiația cosmică de la Budapesta (august-septembrie 1969), durata vieții radiației cosmice (determinată după cantitatea de ¹⁰Be se află în limitele a $(2 \dots 20) \cdot 10^6$ ani. (N.T.).

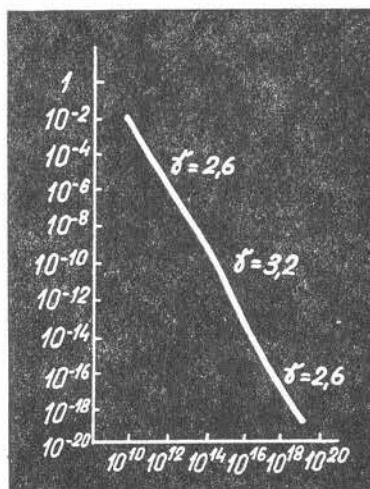


Fig. 17. Intensitatea integrală a radiației cosmice în funcție de energia particulei (în particule/cm² · s · steradian; energia în eV).

rabil pe măsura creșterii activității solare și își atinge valoarea maximă când activitatea Soarelui trece prin minim (ultimele două minime au fost în 1954 și 1965). Dar chiar și în perioada minimului, intensitatea totală a radiației cosmice în apropierea Pământului pare considerabil mai mică decât dincolo de sistemul solar. În special radiația subcosmică fie că nu ajunge de loc la Pământ, fie că ajunge în perioada minimului cu caracteristici simțitor modificate. Aceasta se datorește în cea mai mare parte înlăturării radiației cosmice și subcosmice de către fluxurile de plasmă emise de Soare (așa-numitul vânt solar). De aceea este clar că măsurarea modificărilor intensității radiației cosmice în decursul ciclului de 11 ani al activității solare și în legătură cu procesele solare sporadice reprezintă o metodă de studiu al plasmei interplanetare. Totodată spectrul energetic și cel chimic al radiației cosmice dincolo de limitele sistemului solar este greu de determinat și nici nu ne vom ocupa aici de această problemă încă nerezolvată. În domeniul energiilor mari (când $\epsilon_c > 1 \text{ GeV/nucleon}$) influența sistemului solar devine relativ mică și spectrul ce se observă în apropierea Pământului caracterizează radiația cosmică și în zona apropiată a Galaxiei.

Figura 17 ne dă o idee asupra spectrului radiației cosmice $I(>E)$. Acest spectru este descrescător, adică intensitatea inte-

grală I scade cu creșterea energiei E . În ansamblu, spectrul nu este determinat de vreo lege simplă, dar se poate remarca faptul că pe intervale mari spectrul are practic un caracter exponențial. Aceasta înseamnă că $I(>E)$ este bine aproximată de legea exponențială $I(>E) = K \cdot E^{-(\gamma+1)}$. Astfel, pentru toate radiațiile cosmice din domeniul de energii de la 10 GeV până la 10^6 GeV (10^{15} eV) avem $I_{rc}(>E) = 1,7 \cdot E^{-1,6}$ particule/cm² · s · sterad. Aici energia totală a particulei E este exprimată în GeV și este clar că $\gamma = 2,6$ (γ este exponentul spectrului diferențial, adică $I(E) = \text{const} \cdot E^{-\gamma}$). Gradul de precizie pentru determinarea lui γ va reieși clar dacă vom menționa că în domeniul de energii $E \approx 10 \text{ GeV}$ γ ar trebui să fie mai curînd egal cu 2,5. Dacă componența chimică a radiației cosmice este determinată de datele tabelului 1 în întregul interval considerat (așa cum este probabil cazul), atunci cînd trecem de la energia pe nucleon $\epsilon = E/A$ la energia totală E a nucleului găsim că intensitatea protonilor reprezintă aproximativ 37% din intensitatea radiației cosmice integrale cu o energie mai mare de E . Pentru nucleele de heliu și pentru toate nucleele cu $Z > 2$ aceste intensități reprezintă respectiv 27 și 36% din energia totală.

Nu este lipsit de interes să menționăm de asemenea unele date privind intensitatea totală, concentrația și densitatea energiei radiației cosmice. Astfel, în perioada de minim a activității solare, pentru toate radiațiile cosmice cu energia cinetică mai mare de 100 MeV/nucleon intensitatea $I_{rc} = 0,30$ particule/cm² · s · sterad. Aceasta înseamnă că printr-o porțiune de suprafață de 1 cm² din emisfera direcțiilor trece aproximativ o particulă într-o secundă. Concentrația respectivă a radiației cosmice $N_{rc} = 1,5 \cdot 10^{-10}$ particule/cm³ este cu 10—11 ordine de mărime (!) mai mică decât concentrația gazului interstelar în planul Galaxiei. Dar întrucît energia radiației cosmice este mare, densitatea energiei corespunzătoare, după cum s-a mai menționat în introducere, depășește chiar densitatea energiei interne a gazului. Valorilor menționate I_{rc} și N_{rc} le corespunde o densitate a energiei $w_{rc} = 0,6 \text{ eV/cm}^3 \approx 10^{-12} \text{ erg/cm}^3$. În spațiul interstelar, departe de Soare, densitatea energiei radiației cosmice este poate chiar de cîteva ori mai mare. Această concluzie va fi mai lesne de înțeles dacă ne vom aminti că plasma solară (vîntul solar) acționează mai mult asupra radiației cosmice „moi” (cu energie mică). Totodată, caracterul spectrului radiațiilor cosmice este de așa natură că tocmai particulele

cu energii mai mici (în principal particulele cu 3... 10 GeV/nucleon) aduc cel mai mare aport la w_{rc} .

Deși particulele cu o energie mare nu determină densitatea w_{rc} și ele prezintă un interes deosebit. Spectrul lor pînă la energia $E \approx 10^{15}$ eV, după cum s-a mai spus, este aproximativ același ca și în cazul $E \approx 10^{10}$ eV.

Cînd $E \approx (1... 3) \cdot 10^{15}$ eV, spectrul se modifică și în domeniul de la $E \approx 3 \cdot 10^{15}$ pînă la $E \approx 10^{18}$ eV, exponentul ia valoarea $\gamma = 3,2 \pm 0,1$. Cînd $E > 10^{18}$ eV, γ pare să fie din nou egal cu 2,6, dar în privința aceasta avem foarte puține date. Cea mai mare energie a particulelor observate în radiația cosmică ajunge la 10^{20} eV = 10^8 erg = 10 J. Așadar energia unei asemenea particule (în cele mai multe cazuri e vorba de protoni) este suficientă pentru a aprinde un mic bec electric.

Cea mai mare energie obținută cu ajutorul acceleratoarelor reprezenta încă nu demult 30 GeV = $3 \cdot 10^{10}$ eV. Există două acceleratoare de acest tip, în Elveția și în S.U.A. În U.R.S.S. a intrat de curînd în funcțiune un accelerator de 70 GeV. Abia după zeci de ani ne putem aștepta la crearea unor acceleratoare cu o energie care să ajungă la 1 000 GeV, deși asemenea proiecte există de pe acum. Este clar că utilizarea radiației cosmice rămîne deocamdată și pentru viitor singura metodă de studiere a proprietăților particulelor cu energii foarte mari. Pe Pămînt asemenea cercetări se pot face numai pe munți destul de înalți, dar și acolo fluxul de radiații cosmice primare este considerabil slăbit. Lucrurile stau mai bine în cazul folosirii baloanelor și mai ales a sateliților. În fluxul radiației cosmice numărul de particule cu energii foarte mari este foarte redus. Astfel, în cazul energiei $E = 10^6$ GeV avem $I_{rc} (> 10^6 \text{ GeV}) \approx 10^{-10}$ particule/cm² · s · sterad $\approx 0,1$ particule/m² · zile · sterad. Cu alte cuvinte, asupra unui sistem de contoare cu o suprafață de 1 m² va cădea din emisfera direcțiilor aproximativ o particulă cu o energie mai mare de 10^6 GeV în trei zile. În cazul energiei $E = 10^4$ GeV numărul unor asemenea particule va fi însă de cîteva mii de ori mai mare.

De aici rezultă clar că pentru studierea particulelor din radiația cosmică cu energii foarte mari sînt necesare instalații mari și o perioadă lungă de funcționare a acestora. Concluzia că sînt necesare instalații mari reiese și din faptul că și măsurarea energiei acestor particule este dificilă. Pentru aceasta este nevoie de absorbanți puternici, de straturi mari de substanță.

Vor putea fi deci folosiți numai sateliți grei de mai multe tone (în acest scop în U.R.S.S. au fost lansați pînă acum trei sateliți „Proton” cu o greutate de 12 tone fiecare și un satelit „Proton IV” cu o greutate de 17 tone). Utilizarea eficientă a sateliților grei este o problemă de viitor. Informații cu privire la radiațiile cosmice în domeniul energiilor mai mari de $10^{12}... 10^{16}$ eV au fost obținute și prin studierea jerbilor atmosferice cu front larg. Aceste jerbe sînt fluxuri ale diverselor particule (în special electroni și pozitroni) create de particula primară a radiației cosmice în atmosferă și înregistrate de un sistem de contoare plasate pe Pămînt.

Anizotropia. S-a spus mai sus că radiația cosmică (la mari depărtări de Pămînt și de cîmpul lui magnetic) este în mare măsură izotropă. Aceasta înseamnă că intensitatea I nu depinde de direcție. Dacă excludem domeniul particulelor cu cea mai mare energie, unde precizia măsurătorilor este mai mică, putem spune că gradul de anizotropie a radiației cosmice δ este cu siguranță mai mic de 1%. Prin δ înțelegem raportul $\frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$,

unde I_{max} și I_{min} sînt respectiv intensitatea maximă și minimă (în funcție de direcție). Se observă totuși o anumită anizotropie exprimată printr-o fracțiune de procent, intensitatea maximă înregistrîndu-se într-o direcție apropiată de aceea a centrului Galaxiei. Aceste date se mai cer confirmate, verificate și precizate.

Să notăm doar că o măsurare precisă chiar și a unei anizotropii foarte mici are o importanță principială. Este suficient să spunem că radiațiile cosmice care se formează în Galaxie trebuie să curgă afară din ea și de aceea e de așteptat un flux de radiații cosmice dinspre regiunile centrale ale Galaxiei spre periferia ei, ceea ce pare într-adevăr să se observe. Dacă însă în vecinătatea Pămîntului se observă în special radiații cosmice care vin din spațiul intergalactic, așa cum consideră unii (vezi mai jos), atunci radiația cosmică trebuie să curgă spre interiorul Galaxiei și e de așteptat un alt semn al anizotropiei.

O altă componentă a radiației cosmice: electronii și pozitronii. Alături de protoni și nucleee există și o altă componentă a radiației cosmice: electronii și pozitronii. Intensitatea și densitatea energiei w_e a acestei componente reprezintă însă numai 1%, respectiv din intensitatea totală a radiației cosmice și din densitatea energiei lor w_{rc} . Din această cauză, cît și

pentru unele motive cu caracter metodologic, timp de mulți ani nu a putut fi descoperită componenta electronică, cu toate că importanța studiului ei a fost demult înțeleasă (este suficient să ne referim la datele astronomice examinate mai jos).

Abia în 1961 fizicianul american J. Earle a reușit să descopere în radiația cosmică electroni primari. De atunci pînă în prezent studierea componentei electrono-pozitronică stîrnește un mare interes și constituie o preocupare a cîtorva grupuri de oameni de știință din S.U.A., țările Europei occidentale, U.R.S.S., India și Japonia. Cele mai multe rezultate au fost obținute pînă în prezent, pe cît se pare, de grupul lui P. Meyer de la Universitatea din Chicago.

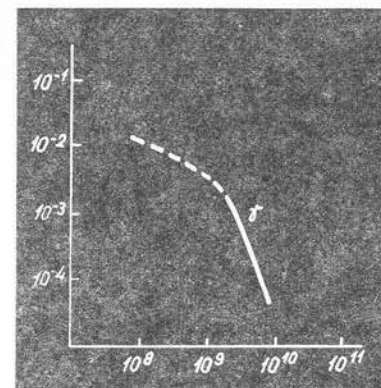
Astăzi este clar că în componenta electrono-pozitronică precumpănesc electronii. De pildă, în intervalul de energii dintre 1 și 5 GeV raportul $e^+/(e^+ + e^-)$, adică raportul dintre intensitatea componentei de pozitroni e^+ și componenta totală de electroni și pozitroni ($e^+ + e^-$) reprezintă nu mai mult de $(5 \pm 3)\%$. În domeniul energiilor mai mici procentul de pozitroni crește, ceea ce nu modifică concluzia principală, deosebit de importantă, pe care o putem trage.

Este vorba de faptul că apariția electronilor în radiația cosmică poate avea două cauze.

În primul rînd ei pot fi accelerați în unele surse și să ajungă la Pămînt, rătăcind, în linii mari, pe aceleași căi ca și pozitronii. În acest caz e de așteptat o evidentă precumpănire a electronilor față de pozitroni, deoarece în sursele de radiație cosmică — dacă nu facem supoziții speciale cu vaste consecințe — nu are cum să apară o cantitate apreciabilă de pozitroni.

În al doilea rînd electronii și pozitronii se formează în radiația cosmică ca produse secundare. Aceasta se petrece în felul următor: protonii și nucleeele rapide (radiația cosmică) ciocnindu-se cu nucleeele din componența gazului interstelar generează mezonii $\pi^\pm$ (rolul particulelor nestabile mai grele pare să fie mic). După cum se știe, mezonii $\pi^\pm$ se dezintegrează rapid în mezonii $\mu^\pm$ și neutrino. Apoi mezonii $\mu^\pm$ se dezintegrează și ei, ceva mai încet, dar la scara cosmică tot instantaneu, în electroni (e^-), pozitroni (e^+) și neutrino. Întrucît radiațiile cosmice (protonii și nucleeele) sînt încărcate, pozitronii pozitivi „secundari” (sau mai exact proveniți din dezintegrare) vor fi chiar mai mulți decît electronii.

Fig. 18. Intensitatea integrală a componentei electronice a radiației cosmice în funcție de energie (în $\text{electron/cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sterad.}$; energia în eV; reprezentare schematică).



Așadar este clar că observațiile menționate ne permit să respingem categoric ipoteza originii secundare a părții principale a componentei electronice a radiației cosmice; această componentă se formează undeva în surse. Îmi voi permite să menționez că această concluzie a fost formulată de S.I. Sirovatski și de mine, pe baza calculului, încă în 1963, înainte de a se fi efectuat măsurătorile respective.

În majoritatea experiențelor electronii nu se separă de pozitroni; se determină spectrul total al componentei electroni-pozitroni (pentru concizie vom vorbi mai jos pur și simplu de electroni). Acest spectru este schematic înfățișat în figura 18. Din păcate, datele încă nu sînt prea exacte și complete. Pare totuși justificată impresia că în cazul unei energii $E_e \approx 2 \dots 3 \text{ GeV}$, iar după unele date și în cazul energiei $E_e \approx 5 \text{ GeV}$, spectrul prezintă o inflexiune. Astfel, pînă la această energie intensitatea diferențială $I_e(E) = \text{const.} \cdot E^{-\gamma}$, unde $\gamma = 1,5 \dots 1,8$ sau chiar $\gamma = 2$. Pentru $E > 2 \dots 6 \text{ GeV}$ și pînă la $50 \dots 100 \text{ GeV}$ $I_e = \text{const.} \cdot E^{-\gamma}$ cu $\gamma = 2,5$. Pentru exemplificare menționăm că, după datele grupului de fizicieni european-japonez, în intervalul de energii de la 3 pînă la 30 GeV $I_e(E) = 1,3 \cdot 10^{-2} E^{-(2,6 \pm 0,2)}$ $\text{electron/cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sterad.}$ GeV, unde energia E se măsoară în GeV. Pentru energiile mai mari de 30–50 GeV valoarea exponentului γ pînă nu demult nu fusese stabilită cu certitudine (după datele fizicienilor indieni ea se apropie de 2, iar după cele ale savanților sovietici de 3). În una din ultimele lucrări ale oamenilor de știință indieni de care avem cunoștință se

arată că pentru intervalul de energii din domeniul 5... 200 GeV exponentul $\gamma = 2,62 \pm 0,05$, iar în cazul energiilor și mai mari în spectru se observă o inflexiune mai bruscă ($\gamma = 3,5$). Încă nu este complet elucidată chestiunea modificării intensității componente electronice în cadrul sistemului solar. Este cel mai probabil că inflexiunea în spectrul electronic când $E = 2...3$ GeV este, pe de o parte, reală, iar pe de altă parte este doar potențial condiționată de devierea introdusă de sistemul solar. Dacă așa stau lucrurile, adică inflexiunea corespunde spectrului de electroni galactici relativști la distanțe mari de sistemul solar, de aici, admitând anumite ipoteze, se pot trage concluzii importante referitoare la originea radiației cosmice.

Prezintă un mare interes determinarea nu numai a spectrului total al componente electrono-pozitronice, ci și separat a spectrului de pozitroni și a spectrului de electroni.

Datele preliminare privind spectrul de pozitroni nu contravin presupunerii că toți pozitronii (și bineînțeles numărul corespunzător de electroni) sînt formați de radiațiile cosmice atunci cînd acestea străbat un strat de gaz interstelar cu o „grosime” de circa 3 g/cm^2 . Aceasta era, de fapt, și de așteptat, judecînd după datele cu privire la componența chimică a radiației cosmice. În intervalul $1 \leq E \leq 10$ GeV spectrul de pozitroni este exponențial cu $\gamma = 2,6 \pm 0,5$.

Unele concluzii. Studiul radiației cosmice primare prezintă dificultăți. Faptul acesta explică de ce în cercetare mai există atît de multe „pete albe”, în pofida eforturilor încordate și îndelungate. Dar chiar dacă aceste pete albe ar dispărea (ceea ce se va întîmpla mai devreme sau mai tîrziu), studiul radiației cosmice limitat numai la vecinătatea Pămîntului e îndoielnic că ar avea drept rezultat dezvoltarea astrofizicii radiației cosmice și rezolvarea problemei originii lor.

Călcîiul lui Ahile, punctul cu adevărat slab, este izotropia radiației cosmice. Din această cauză (existența unei slabe anizotropii nu schimbă situația) o examinare oricît de detaliată a radiațiilor cosmice în vecinătatea Pămîntului ne oferă doar date indirecte privind sursele lor: poziția, numărul, intensitatea acestora etc. Avem aceeași situație ca aceea care ar apărea în astronomia optică dacă nu am putea studia spectrele fiecărei stele și nebuloase, ci numai spectrul rezultat al tuturor corpurilor cerești în ansamblu.

Cauza pentru care în astronomia optică și în studiul radiației cosmice în vecinătatea Pămîntului situația este atît de diferită este lesne de înțeles. Lumina se propagă practic în linie dreaptă, așa încît obținem în telescop o imagine a surselor de lumină. Cît despre radiația cosmică, ea este formată din particule încărcate a căror traiectorie se curbează în cîmpurile magnetice interstelare. Rătăcirea prin aceste cîmpuri magnetice în mare măsură neordonate, precum și unele efecte de plasmă fac ca radiația cosmică să „uite” aproape în întregime direcția în care au fost emise de surse.

De aceea, dezvoltarea astrofizicii radiației cosmice a putut începe numai după ce a apărut posibilitatea de a avea informații privind radiația cosmică la mari distanțe de Pămînt.

Radiația cosmică în univers

Sursele de informație. Uneori, însuși modul de a pune problema este suficient pentru a asigura găsirea soluției. Și totuși problema nu se pune! Putem oare primi informații asupra radiației cosmice la mari distanțe de Pămînt? N-am găsit încăieri indicații asupra faptului că această problemă s-ar fi discutat înainte de anii 1950—1951. Or, fizicienii dispuneau de toate informațiile care ar fi permis să indice chiar mai multe căi de studiere a radiației cosmice din univers. Într-adevăr, încă de mult s-a presupus — ba chiar se poate afirma că se știa — că în cosmos există cîmpuri magnetice slabe, dar foarte întinse. Dar în mișcarea lor în cîmpul magnetic (ca și în orice mișcare în care suferă accelerații) particulele încărcate — și în mod deosebit de intens electronii ușori — emit unde electromagnetice. Pentru particulele relativiste (de pildă, pentru electroni) o asemenea radiație, numită radiație de frinare magnetică sau sincrotronă, are particularitățile ei, care au început să fie studiate cu peste 50 de ani în urmă de către fizicianul englez G. Shott. De aceea, făcînd unele supoziții foarte îndrăznețe, dar perfect judicioase, cu privire la intensitatea acestor electroni, s-ar putea ușor ajunge la convingerea că radiația sincrotronă a componente electronice a radiației cosmice poate fi observată de pe Pămînt. Radiația cosmică generează radiații

electromagnetice de diverse lungimi de undă și ca urmare a unei serii întregi de alte procese.

Cu toate acestea, prorocii au păstrat tăcerea, așa cum se întâmplă adesea, și nu au prezis radiația cosmică din domeniul radio, deși este deosebit de puternică. Ea a fost descoperită odată cu nașterea radioastronomiei.

Abia în 1950 Alfvén și Herlofson, Kippenheuer, iar apoi și autorul prezentului articol au început să recurgă la mecanismul sincrotron pentru a explica natura radiației cosmice din domeniul radio. Odată cu aceasta, pentru fizicieni a devenit clară eficiența excepțională și caracterul natural al acestui mecanism în condițiile cosmice.

Cu toate acestea, mulți astronomi care utilizează fizica pe scară largă o tratează totuși cu o anumită neîncredere (probabil tocmai din această cauză îi vedem adesea pe astronomi fie încercând să depășească în general anumite limite ale fizicii contemporane, fie recurgând la ipoteze și modele cât se poate de neverosimile din punct de vedere fizic). Afară de aceasta, în domeniul astronomiei și cosmologiei galactice și extragalactice nu pot fi date răspunsuri la numeroase probleme fundamentale, iar verificarea și infirmarea chiar și a celor mai extravagante concepții cere un volum foarte mare de muncă. Toți acești factori, care continuă să acționeze și în prezent, au generat în astronomie mai multe ipoteze îndrăznețe.

Astfel, pentru explicarea puternicei radiații cosmice radio s-a presupus că în Galaxie există un număr uriaș de radiostele, stele de un tip necunoscut în trecut, înzestrate cu proprietăți cât se poate de neobișnuite. Cu toate că ipoteza radiostelelor avea, după părerea mea, un caracter cu totul necompetitiv în comparație cu ipoteza sincrotronică, aceasta din urmă a triumfat abia după destul de multă vreme.

Chiar și în U.R.S.S., unde mecanismul sincrotron a fost discutat și susținut în afară de mine de G.G. Ghetmanțev și I.M. Gordon, ipoteza radiostelelor a fost abandonată abia în 1953. Printre astronomi, care pe atunci erau încă obișnuiți în general cu domeniul optic, mecanismul sincrotron a devenit mai popular după ce I.M. Gordon și apoi I.S. Șklovski au recurs la el pentru a explica radiația optică cu spectrul continuu în erupțiile solare și în nebuloasa Crabul.

S-a dovedit esențială și împrejurarea subliniată de I.M. Gordon și de mine că radiația sincrotronă poate fi puternic polari-

zată. Această concluzie este desigur cu totul banală, deoarece vectorul electric al undelor electromagnetice, după cum se știe prea bine, are în general aceeași direcție ca și accelerația particulei. Dar în cazul mișcării în câmpul magnetic particula se accelerează într-o direcție perpendiculară pe acest câmp. Ce-i drept, polarizarea radiației observate poate să scadă considerabil sau practic să și dispară dacă câmpul în zona de emisie este neordonat, ca și din alte motive (influența mediului). Totuși polarizarea se observă destul de des: de pildă în cazul radiației optice și al radiației radio centimetrice emise de nebuloasa Crabul.

Fără îndoială, măsurătorile privitoare la polarizare sînt importante și interesante. Am considerat însă întotdeauna și continuu să consider că natura sincrotronă a radiației din domeniul radio, și în unele cazuri și a unei părți din radiația optică a nebuloasei Crabului, a Galaxiei și a radiogalaxiilor, poate fi suficient de bine stabilită și independent de măsurarea polarizării.

Sperăm că această incursiune în istorie, mărturie a unui participant la „evenimente” — și acești participanți nu sînt chiar atît de numeroși și cu timpul vor rămîne din ce în ce mai puțini — va prezenta pentru cititori un oarecare interes. În ceea ce privește mecanismul sincrotron ca atare, nu avem posibilitatea să ne oprim aici asupra lui; de altfel, lucrul acesta s-a mai făcut în repetate rînduri. Pentru cele ce urmează avem nevoie doar de următorul rezultat: intensitatea $I(\nu)$ a radiației sincrotrone de frecvență ν , creată de electronii cu spectrul $I_e(E) = KE^{-\gamma}$, este proporțională cu produsul $KLH^{(\gamma+1)/2\nu^{-(\gamma-1)/2}}$, unde L este dimensiunea zonei de-a lungul razei vizuale ocupată cu electroni emițători de radiație, intensitatea câmpului magnetic în această zonă fiind egală cu H , iar direcția câmpului, în medie, fiind considerată haotică. De aici reiese clar că radiația sincrotronă cu spectrul de tipul $I(\nu) = \text{const.} \cdot \nu^{-\alpha}$ este emisă de electroni cu un spectru energetic exponențial $KE^{-\gamma}$, unde $\gamma = 2\alpha + 1$. Prin urmare, măsurînd exponentul spectral al radiației α îl vom găsi pe γ . Dacă sînt cunoscute sau se evaluează într-un fel și câmpul H și dimensiunea L , vom găsi măsurînd intensitatea $I(\nu)$ coeficientul K și deci și intensitatea componentei electronice $I_e = KE^{-\gamma}$.

Cea mai mare dificultate de care ne lovim cu acest prilej este, principal vorbind, estimarea cîmpului H . De obicei se procedează în felul următor: se consideră că în sursă densitatea energiei radiației cosmice w_{rc} este egală sau aproximativ egală cu densitatea energiei cîmpului magnetic $w_H = H^2/8\pi$, ceea ce echivalează cu presupunerea că presiunea magnetică și presiunea radiațiilor cosmice sînt aproximativ egale.

Firește, aceasta nu este o lege a naturii. În principiu, w_{rc} și w_H se pot afla într-un raport oarecare. În condițiile cosmice reale, ipoteza menționată are totuși temeiuri adînci, iar într-o serie de cazuri este neîndoios justă. Aceasta are loc, de pildă, în discul Galaxiei, unde cîmpul magnetic poate fi evaluat prin diverse metode, iar densitatea w_{rc} este egală cu 10^{-12} erg/cm³ (vezi mai sus). Caracterul firesc al condiției $w_{rc} = w_H$ este limpede, bunăoară, dacă considerăm anvelopele supranovelor. Ca urmare a exploziei, supranova își pierde anvelopa și generează o cantitate mare de radiație cosmică. Este posibil ca la început presiunea radiației cosmice să fie în acest proces considerabil mai mare decît presiunea cîmpului magnetic. Dar în acest caz radiația cosmică va trece relativ liber prin anvelopă și abia după stabilirea egalității aproximative a presiunii cîmpului și a radiației cosmice aceasta din urmă se va putea menține în anvelopă un timp îndelungat.

Există și alte considerații care pledează pentru valabilitatea aprecierii $w_{rc} \approx w_H = H^2/8\pi$, de pildă în radiogalaxii. Astfel, dacă presiunea radiației cosmice ar fi mai mare, cu greu ne-am putea aștepta la o mare neomogenitate în distribuția radiostrălucirii în cadrul radiosursei; imaginea ar fi mai curînd destul de omogenă. În realitate, după un timp suficient de mare de la explozie, situația nu se mai prezintă astfel. Din păcate, chiar dacă admitem egalitatea $w_{rc} = H^2/8\pi$, pentru calcule trebuie să mai admitem o ipoteză privind numărul relativ de electroni în toată radiația cosmică. E vorba de faptul că particulele mai grele — protonii și nucleele —, în condițiile care ne interesează acum, practic nu emit radiații, iar noi vrem să cunoaștem și w_{rc} , și densitatea energiei electronilor relativști w_e . După cum am văzut, în radiația cosmică în vecinătatea Pămîntului $w_e \approx 10^{-2} w_{rc}$. Această ipoteză se admite de obicei și în ceea ce privește anvelopele supranovelor și radiogalaxiile. Există pentru aceasta temeiuri, dar, ceea ce este principal, rezultatul calculului intensității componente

electronice din sursă depinde într-o măsură destul de slabă de ponderea componente electronice. De aceea, dacă nu putem calcula riguros, avem cel puțin posibilitatea de a face o evaluare destul de sigură a energiei totale a radiației cosmice din sursele de radiație cosmică sincrotronă din domeniul radio. Menționăm că în afară de metoda amintită mai există și alte metode de evaluare a densității energiei și a energiei totale a radiației cosmice în surse, de pildă în anvelopele supranovelor.

Uneori radiația sincrotronă se observă și în domeniul optic al spectrului, iar pentru nebuloasa Crabul, probabil, și în domeniul Roentgen. Radiația optică, radiația Roentgen și radiația gamma apar ca urmare a interacțiunii electronilor relativști nu numai cu un cîmp magnetic static, ci și cu un cîmp variabil, de pildă cu undele electromagnetice. În limbaj cuantic putem vorbi aici despre transformarea fotonilor: un foton moale (de pildă, un foton radio sau optic), interacționînd într-un anumit mod cu un electron rapid, se transformă într-un foton mai dur, optic, Roentgen sau gamma.

Există și alte procese care duc la generarea fotonilor de către radiațiile cosmice (se formează și particule neutrino, dar ele pot fi cu greu detectate, din care cauză nu vom vorbi mai amănunțit despre ele). De pildă, am mai menționat că în radiația cosmică se nasc mezonii $\pi^\pm$. Dar totodată se nasc și mezonii π^0 , care practic se dezintegrează instantaneu în doi fotoni gamma. Energia fiecăruia dintre acești fotoni în cazul dezintegrării unui mezon π^0 lent (nerelativist) este egală cu aproximativ 70 MeV.

Așadar, recepționînd o radiație electromagnetică generată de radiația cosmică și care se propagă în linie dreaptă, putem obține o informație despre radiația cosmică din colțurile îndepărtate ale universului. Practic asemenea informații se obțin astăzi mai ales prin metodele radioastronomice și se referă direct numai la componenta electronică a radiației cosmice. În viitor, este încontestabil că va crește ponderea informației primite și prin intermediul radiațiilor din alte domenii, în special din domeniul radiației Roentgen și gamma.

Anvelopele supranovelor. În medie o dată la aproximativ 30 de ani în Galaxie apare o supranovă. Din păcate, din pricina absorbției luminii de către pulberea interstelară, exploziile supranovelor se observă pe Pămînt mult mai rar. Astfel nebuloasa Crabului a izbucnit în 1054, supranova Tycho Brahé

în 1572, iar supranova Kepler în 1604. De atunci se pare că nu s-au observat erupții luminoase atât de puternice, deși, fără îndoială, au apărut câteva supranove.

Cea mai remarcabilă este supranova din constelația Casiopeea, care a apărut cu 250 de ani în urmă, dar a fost descoperită abia în 1948, prin mijloace radio. Radiosursa ce-i corespunde, Casiopeea A, este, în domeniul metric, cea mai puternică de pe „firmamentul radio“, dacă nu ne referim la Soare, care uneori emite o radiație și mai puternică: ca urmare a unei serii de procese din atmosfera Soarelui, radiostrălucirea Soarelui crește uneori considerabil. După descoperirea în domeniul radio a supranovei Casiopeea A, anvelopa ei a fost detectată și în domeniul optic, dar numai după mari eforturi și cu ajutorul celor mai bune telescoape.

Natura și caracterul izbucnirilor prilejuite de apariția supranovelor nu au fost încă nici pe departe clarificate. Este cel mai plauzibil că stelele de acest tip își pierd stabilitatea și se contractează rapid (are loc o prăbușire gravitațională, un colaps), transformându-se, probabil, într-o stea neutronică. În cazul unui asemenea colaps o parte considerabilă a energiei și a masei stelei în forma ei inițială „se revarsă“ în afară. Ca urmare se formează o anvelopă care se dilată. În cazul Casiopeei A masa acestei anvelope atinge o mărime care depășește de câteva ori masa Soarelui, iar viteza ei ajunge la 7 000—8 000 km/s. Ne putem da seama cu ușurință că energia unei asemenea anvelope, chiar dacă are o masă egală cu a Soarelui ($M_s = 2 \cdot 10^{33}$ g), se ridică la $5 \cdot 10^{50}$ erg. Pentru comparație vom aminti că Soarele emite în total $3,86 \cdot 10^{33}$ erg/s sau aproximativ 10^{41} erg/an. Nu este întâmplător că în momentul erupției luminoase care rămâne puternică numai un număr de săptămâni sau de luni, supranova poate avea o strălucire mai mare decât întreaga galaxie în care se află.

În general vorbind, anvelopele supranovelor sînt sursele unei puternice radiații sinerotrone. Este deci incontestabil că apariția unei supranove este însoțită de generarea cel puțin a componentei electronice a radiației cosmice. Dar dintr-o serie de motive (vezi, între altele, considerațiile de mai jos) este cel mai probabil că în majoritatea cazurilor (poate chiar în toate cazurile) explozia supranovelor generează efectiv nu numai electroni relativiști, ci și componenta protoni-nuclee a radiației cosmice.

După datele privind radiația din domeniul radio a supranovelor putem evalua — după cum s-a arătat mai sus — energia radiației cosmice din anvelopa lor. În acest caz, obținem valori $w_{supran.rc.} \approx 10^{47} \dots 10^{50}$ erg. Dacă ținem seama de faptul că o parte a radiației cosmice, după toate probabilitățile, este emisă de anvelope în stadiile timpurii, putem considera că în medie în supranovă se formează radiație cosmică cu o energie $10^{48} \dots 10^{51}$ erg (o precizie mai mare nu poate fi realizată).

Dacă în privința componentei protoni-nuclee apare aici un element ipotetic în plus, în schimb generarea componentei electronice (cu o energie totală $W_{supran.e} \approx 10^{46} \dots 10^{48}$ erg la o erupție) poate fi considerată ca demonstrată. Nu ne vom opri aici asupra particularităților diverselor supranove. Vom remarca doar că nebuloasa Crabului, respectiv supranova din anul 1054, este un obiect singular. Ea emite nu numai radiație din domeniul radio, ci și radiație optică sinerotronă. S-a observat, de asemenea, radiația Roentgen a nebuloasei Crabului care, după toate probabilitățile, are și ea o natură sinerotronă. În acest caz însă, înaintea măsurărilor privitoare la polarizare este într-adevăr dificil să rezolvăm univoc problema naturii radiațiilor, deoarece există o alternativă: radiația Roentgen ar putea fi emisă de un nor de plasmă fierbinte.

Prezența radiației sinerotrone optice (fără să mai vorbim de radiația sinerotronă Roentgen) atestă că în nebuloasa Crabului există electroni cu energii de ordinul $10^{11} \dots 10^{12}$ eV și chiar mai mari. Acești electroni își pierd destul de repede energia și cel mai probabil este că ei n-ar fi putut „supraviețui“ din momentul exploziei pînă astăzi. Afară de aceasta, în nebuloasa Crabului se observă niște mișcări în interiorul anvelopei și tot acolo a fost observată o sursă foarte compactă de radiație radio de unde lungi. Este cel mai probabil că aici a rămas ceva din momentul erupției stelei și acest „ceva“ continuă să genereze radiație cosmică. Este de presupus că studiul nebuloasei Crabului va mai prilejui multe concluzii interesante¹.

¹ Aceasta a fost situația pînă la sfîrșitul anului 1968. În 1968 a fost descoperită existența unor radiosurse de tip nou, pulsarii, cărora le este consacrat ultimul articol din acest volum. La sfîrșitul anului 1968 s-a găsit că într-o anvelopă destul de veche a unei supranove (anvelopa Velei X) se găsește pulsarul PSR 0,833-45 cu o perioadă de 0,089 s, iar în nebuloasa Crabului a fost descoperit pulsarul NP 0532

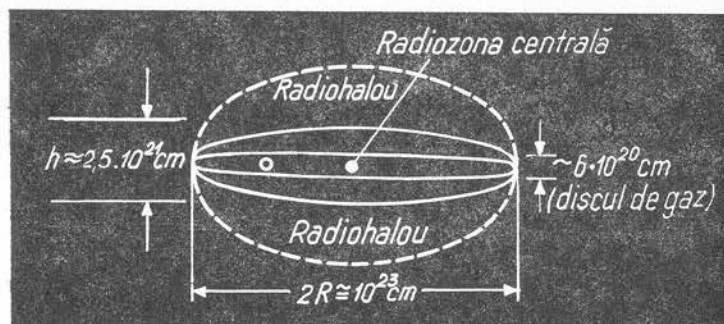


Fig. 19. Reprezentarea schematică a Galaxiei în domeniul radio.

Galaxia, haloul și nucleul ei. Anvelopele supernovelor din Galaxie (acestea fiind de altfel singurele care pot fi observate) „luminează” pe cerul radio ca niște pete mai mult sau mai puțin strălucitoare. Mărimea anvelopelor relativ tinere și strălucitoare pe care le-am putea supranumi „istorice” (nebulosa Crabului, Casiopeea și altele) nu depășește câteva minute unghiulare (dimensiunea unghiulară a Soarelui și a Lunii fiind de aproximativ 30'). Dimensiunea anvelopelor vechi este, bineînțeles,

cu o perioadă de 0,033. Dintre toți pulsarii înregistrați pînă la jumătatea anului 1970, cei doi pulsari menționați au perioadele cele mai scurte. Afară de aceasta a reieșit că perioada pulsarului din nebuloasa Crabului crește în așa fel încît în aproximativ 2 500 de ani trebuie să se dubleze. În ianuarie 1969 s-a demonstrat că pulsarul NP 0532 din nebuloasa Crabului se observă și în domeniul optic: s-a constatat că izvorul radiației pulsatorii (cu aceeași perioadă ca în domeniul radio) este una din cele două stele mici care și mai înainte erau considerate ca făcînd parte din nebuloasa Crabului; în această privință nu există însă o mare certitudine (să ne amintim că descoperirea unei stele pe fotografia unei nebuloase încă nu demonstrează că steaua se află în această nebuloasă, deoarece ea se poate găsi în fața acesteia sau în spatele ei și totuși să se proiecteze pe fotografia nebuloasei). Mai exact, pulsează aceea din cele două stele mici care, începînd din 1942, era considerată cu cel mai înalt grad de probabilitate ca rămășiță a supernovei din 1054, care a generat nebuloasa Crabului.

Este aproape în afară de orice îndoială că mica stea asimilată cu pulsarul NP 0532 este tocmai sursa de activitate din nebuloasa Crabului, și în primul rînd sursa particulelor relativiste. Ce reprezintă această sursă? Un răspuns precis încă nu se poate da. Cel mai probabil este că avem de-a face cu o stea neutronică cu un puternic cîmp magnetic, că ea se rotește cu mare viteză și, poate, și pulsează (vezi capitolul următor din prezentul volum).

mai mare, dar și ele păstrează deocamdată o anumită individualitate și acoperă doar o parte din cîmpul vizual. Restul cîmpului vizual, în special în vecinătatea Căii Lactee (a planului Galaxiei) emite și el unde radio, așa încît putem vorbi despre o radiație galactică generală în domeniul radio.

Sursa acestuia sînt electronii relativști care rătăcesc prin cîmpurile magnetice galactice. Intensitatea radiației radio crește considerabil în planul Galaxiei. Într-o primă aproximare se poate spune că electronii completează un „disc radio” cu o grosime h de aproximativ 2 500 de ani-lumină = $2,5 \cdot 10^{21}$ cm și cu o rază $R \approx 5 \cdot 10^{22}$ cm (fig. 19). Este esențial faptul că stratul (discul) ocupat de gazul concentrat în ramurile spiralei galactice este de cîteva ori mai subțire, grosimea lui fiind de aproximativ 600 de ani-lumină.

Această situație este într-un totu firească, deoarece spirala galactică nu este o formație riguros ordonată. Ea constă din bucăți și, în orice caz, radiația cosmică o poate părăsi destul de liber. Ca urmare, radiația cosmică umple o zonă cu mult mai mare decît stratul de gaze.

Mai mult decît atît, încă în 1952 S. B. Pikelner a formulat presupunerea că există un halou sau o coroană galactică: o zonă evasisferică plină cu radiație cosmică și gaz rarefiat care înconjură discul optic al Galaxiei. Se poate considera că discul optic coincide cu stratul de gaz, deoarece tocmai aici se găsesse stelele tinere, cele mai fierbinți și deci cele mai strălucitoare.

În acea perioadă nu se știa aproape nimic despre existența discului radio. Or, sub raport fizic el se prezintă tocmai ca un fel de halou, dar puternic aplatizat. În ceea ce privește haloul evasisferic cu o rază de $(3 \dots 5) \cdot 10^{22}$ cm, problema existenței lui în Galaxie este considerată astăzi deschisă. Într-adevăr, această importantă problemă încă nu a fost lămurită, dar în favoarea existenței unui halou și dincolo de limitele discului radio pledează o serie de considerente serioase.

Astfel, nu există nici un temei pentru ca razele cosmice să nu aibă posibilitatea de a depăși cadrul discului radio, antrenînd gaze și cîmpuri magnetice. Dimpotrivă, considerente teoretice pledează în favoarea acestei posibilități, ceea ce va duce la „rotunjirea” discului, deci la formarea unui halou mai umflat. Ce-i drept, radiostrălucirea unui asemenea halou ar putea fi mică. Este într-un totu posibil totuși să existe și un halou

radio, adică o zonă evasisferică care să poată fi observată în domeniul radio.

De fapt, o asemenea radiație radio provenită din regiunea din afară a discului radio se observă indiscutabil și este destul de intensă. Problema constă în a constata dacă sursele acestei radiații sînt localizate în halou sau se situează în afară, în metagalaxie. Această dilemă poate fi rezolvată și s-au făcut eforturi efective pentru a o rezolva prin studiul dependenței unghiulare a radiației radio din afara discului. Radiația metagalactică este după toate probabilitățile absolut izotropă. În schimb, radiația provenită din haloul radio trebuie să depindă de direcție, deoarece sistemul solar se află la o distanță de $3 \cdot 10^{22}$ cm de centrul Galaxiei și centrul probabil al haloului (fig. 20). Pentru un halou cu o dimensiune caracteristică de $(3 \dots 5) \cdot 10^{22}$ cm radiația radio în direcțiile *A* și *B* trebuie să fie de două ori mai puternică decît în direcțiile *C* și *D*. Unele modificări confirmă această presupunere, altele o contrazic. Lucrul acesta nu este întîmplător și este legat de o serie de împrejurări care complică problema, printre care faptul că strălucirea radiației galactice în domeniul radio se schimbă odată cu modificarea direcției, precum și cu o serie întregă de „detalii” prezente pe firamentul radio și care nu se încadrează în imaginea simplificată formată doar din discul radio și halou. Iată cauza — și nu este singura — pentru care numai măsurătorile unghiulare, chiar foarte precise, nu pot totuși rezolva univoc problema existenței haloului radio.

Notăm că și galaxia spirală M 31 (marea nebuloasă din constelația Andromeda), cea mai apropiată de Galaxia noastră și înrudită cu ea, are cu certitudine un halou radio.

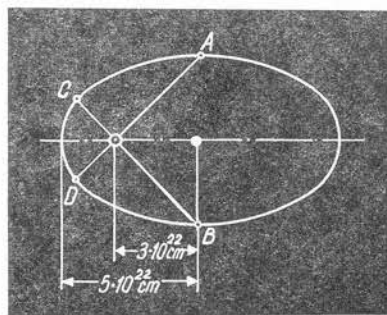


Fig. 20. Haloul radio evasisferic (schemă).

În afară de discul radio, haloul radio și de unele „detalii radio”, printre care pot fi luate în considerare și anvelopele supranovelor, mai există încă o zonă cu caracter special: nucleul Galaxiei. Nucleul său, sau, ca să folosim o noțiune mai generală, radiozona centrală, se află în centrul Galaxiei. Aici există o radiație radio sincrotronă destul de puternică, se observă mase de gaz în mișcare rapidă și, în sfîrșit, s-a constatat existența unui nucleu în sensul propriu al cuvîntului. Radiația provenită de la nucleu se observă în domeniul infraroșu (lumina vizibilă nu poate să ne parvină de la nucleu din pricina absorbirii ei de către pulberea interstelară); de notat că radiația optică totală a nucleului (luminozitatea) depășește de 20 milioane de ori luminozitatea Soarelui. Nu este exclus ca nucleul să erupă din cînd în cînd (bunăoară o dată la $10^7 \dots 10^8$ ani), emițînd o mare cantitate de radiație cosmică. Este posibil de asemenea ca nucleul să emită tot timpul această radiație, cum se întîmplă în cazul quasarelor.

În concluzie, constatăm că radiația cosmică (mai exact componenta ei electronică) este cert generată în anvelopele supranovelor și, posibil, în nucleul galactic. Radiația cosmică umple discul radio și poate și o zonă mai mare: haloul. În discul radio densitatea radiației cosmice este aproximativ aceeași ca în vecinătatea sistemului solar, iar în halou ea este probabil de cîteva ori mai mică, dar, dacă haloul radio există, atunci la distanțe *R* de ordinul a $(3 \dots 5) \cdot 10^{22}$ cm densitatea radiației cosmice mai este încă considerabilă.

Galaxiile normale, radiogalaxiile, quasarii și spațiul intergalactic. Ar fi cu totul ciudat dacă radiația cosmică ar exista numai în Galaxia noastră și ar lipsi în alte galaxii.

Într-adevăr, în această privință Galaxia noastră nu se distinge întru nimic de altele. Ea face parte din așa-numitele galaxii normale, adică galaxii nu prea strălucitoare în domeniul radio.

Radioluminozitatea Galaxiei L_r este de aproximativ $3 \cdot 10^{38}$ erg/s, respectiv de sute de ori mai mică decît luminozitatea ei optică $L_o = 5 \cdot 10^{43}$ erg/s. După cum este astăzi bine-cunoscut, există galaxii de un tip deosebit — radiogalaxii — incomparabil mai strălucitoare în domeniul radio. Astfel, una din radiogalaxiile cele mai strălucitoare, Lebăda A (de altfel prima sursă discretă de radiație cosmică radio în afară de Soare, descoperită de fapt încă în 1946) emite în domeniul radio

cu o luminositate $L_r = 5 \cdot 10^{44}$ erg/s în timp ce luminositatea optică $L_o = 10^{44}$ erg/s.

Practic, toate radiogalaxiile, fără excepție, sînt galaxii eliptice strălucitoare. Asemenea galaxii (spre deosebire de galaxiile eliptice neștrălucitoare) sînt destul de puține la număr, fiind separate în medie prin distanțe de 60 milioane de ani-lumină, în timp ce distanța medie dintre galaxii în general este de vreo 10 ori mai mică, ceea ce înseamnă că numărul galaxiilor obișnuite este de aproximativ 1000 de ori mai mare.

Cantitatea de energie cuprinsă în radiația cosmică a radiogalaxiilor strălucitoare este fantastic de mare. De pildă, în Lebăda A energia totală a radiației cosmice $W_{rc} = (10^{50} \dots 10^{51})$ erg.

Pentru comparație amintim că energia de repaus a Soarelui $M_s c^2 = 2 \cdot 10^{54}$ erg.

Uriasă degajare de energie care se observă în radiogalaxii pare să fie o urmare a colapsului gravitațional (a unei contractări foarte repezi) a nucleului acestor galaxii. Energia se degajă sub forma unor produse ale exploziei (mase de gaz care se împrăștie în toate direcțiile, radiație cosmică) datorită micșorării energiei gravitaționale. Galaxiile eliptice se rotesc slab (spre deosebire de galaxiile spirale), de aceea este firesc ca tocmai în ele să se formeze nuclee mari: acumulări de gaz în centrul galaxiilor.

Este probabil că în toate aceste procese (contractarea și explozia nucleului, formarea radiației cosmice) cîmpurile magnetice joacă un mare rol.

În 1963 s-a stabilit definitiv și existența unui nou tip de obiecte: quasarii. Este incontestabil că radiația în domeniul radio a quasarelor cît și a radiogalaxiilor este în primul rînd de natură sincrotronă. Mai mult decît atît, radiația optică puternică a quasarelor este, de asemenea, cel puțin parțial, sincrotronă.

Natura quasarelor este una dintre cele mai interesante probleme ale astronomiei moderne. Nu este locul aici să ne oprim asupra ei mai amănunțit. Este suficient să arătăm că dacă quasarii se află la distanțe mari sau, cum se obișnuiește să se spună, la distanțe cosmologice, numărul lor este relativ mic. Probabil că așa și este, deși există și un alt punct de vedere, potrivit căruia quasarii observați se situează în vecinătatea Galaxiei și poate chiar au fost expulzați din nucleul ei.

Ipotezele locale privind natura locală a quasarelor mi s-au părut întotdeauna și mi se par și astăzi atît de hazardate și de neverosimile din punct de vedere fizic, încît pentru discutarea lor serioasă nu există încă suficiente temeiuri. Un asemenea temei ar putea fi, de pildă, descoperirea unor quasari cu deplasarea spre violet a liniilor spectrale. Or, în toate cazurile cunoscute — numărul lor depășește 100 — liniile spectrale ale quasarelor se deplasează spre roșu.

În ceea ce privește faptul, sugerat de unele date (dar neconfirmat de alte măsurători) că dimensiunile deplasării spre roșu pentru liniile de emisiune și în special pentru liniile de absorbție ale quasarelor sînt grupate în jurul unei anumite valori, el este în principiu compatibil cu natura cosmologică și nu cu una locală a quasarelor (vezi amănunte în studiul precedent).

Dacă quasarii sînt într-adevăr niște obiecte foarte îndepărtate, ceea ce pare să fie în afară de orice îndoială, ele reprezintă cel mai probabil niște nuclee galactice fără altă „zestre” sau niște gigantice stele în rotație, care nu se află în echilibru, avînd o masă de 10^8 ori mai mare decît masa Soarelui și puterice cîmpuri magnetice (atît ordonate cît și turbulente).

Procese care au loc în radiogalaxii și în quasari constituie o problemă aparte; pe noi aceste obiecte, ca și galaxiile normale, ne interesează în calitatea lor de surse ale radiației cosmice care pătrunde în spațiul intergalactic. Calculele estimative arată că datorită acțiunii acestor surse, în spațiul intergalactic nu se pot acumula radiații cosmice cu o densitate a energiei $W_{intergalactic}$ mai mare de 10^{-15} erg / cm³, deci cu trei ordine de mărime mai mică decît densitatea energiei radiației cosmice în Galaxie $w_g \approx 10^{-12}$ erg / cm³. Valoarea probabilă este și mai mică: ea nu depășește 10^{-16} erg / cm³. Nu toți sînt de acord cu aceste calcule estimative, din care cauză considerăm că este deosebit de important să căutăm să obținem informații despre radiațiile cosmice intergalactice printr-o metodă directă. Metoda radioastronomică se dovedește ineficace în acest caz, deoarece intensitatea cîmpului magnetic metagalactic este prea mică. Din fericire, ne vin în ajutor astronomia gamma și Roentgen.

În 1965 s-a ajuns la concluzia că întregul spațiu intergalactic este plin de o radiație termică electromagnetică cu o temperatură de 3°K (astăzi se consideră că o valoare mai precisă este $T = 2,7^\circ\text{K}$). Densitatea energiei acestei radiații se apro-

pie de $w_{\text{foton}} = 4 \cdot 10^{-13}$ erg / cm³. Sub raportul pierderilor pe care le suferă electronii relativişti atunci cînd se mişcă într-un câmp cu o asemenea radiaţie, ea este echivalentă cu un câmp magnetic cu o intensitate $\sqrt{8\pi w_{\text{foton}}} \approx 3 \cdot 10^{-6}$ e, ceea ce depăşeşte de mii de ori intensitatea câmpului în metagalaxie. Energia medie a fotonilor pentru o radiaţie cu temperatura 2,7°K este $e_{\text{foton}} \approx 6 \cdot 10^{-4}$ eV (lungimea de undă $\lambda \approx 0,2$ cm, ceea ce înseamnă că această radiaţie ţine de domeniul undelor milimetrice), dar după împărţirea pe electroni relativişti energia fotonilor se modifică considerabil. Ca urmare se formează în primul rînd radiaţia Roentgen.

În ultimii ani radiaţia cosmică Roentgen a putut fi înregistrată şi totodată s-a descoperit în ea o componentă difuză. Această radiaţie Roentgen difuză, în limitele preciziei realizate, vine uniform din toate părţile (în intervalul lungimilor de undă de la 2 pînă la 8 angstroemi, intensitatea radiaţiei difuze este de aproximativ 10 fotoni / cm² · sterad.

Considerînd că radiaţia Roentgen difuză este generată de componenta electronică a radiaţiei cosmice în spaţiul metagalactic, putem evalua intensitatea acestei componente. Se constată că ea este cel puţin de 1 000 de ori mai mică decît intensitatea componentei electronice în Galaxie.

Radiaţia termică intergalactică se află în interacţiune nu numai cu electronii, ei şi cu protonii şi cu nucleele de foarte mare energie (în acest caz într-un sistem de coordonate legat de nucleu fotonul apare ca o cuantă gamma suficient de dură). Procesele esenţiale care au loc în aceste condiţii sînt scindarea fonică a nucleelelor şi generarea fonică a mezonilor π . De aici urmează, între altele, că protonii şi nucleele altor atomi cu o energie mai mare de aproximativ $3 \cdot 10^{19} \dots 10^{20}$ eV şi care vin de la o mare distanţă nu pot ajunge la Pămînt. Această concluzie nu se află în contradicţie cu experienţa şi în curînd ea va putea fi verificată datorită intrării în funcţiune a unei instalaţii care se construieşte în Australia şi care va putea înregistra liniile atmosferice largi generate de o particulă cu o energie mai mare de 10^{20} eV. În afară de radiaţia termică cu $T = 2,7^\circ\text{K}$, în spaţiul intergalactic mai există radiaţia luminoasă a stelelor (densitatea energiei ei este de aproximativ 10^{-14} erg / cm³), precum şi o cantitate oarecare de gaz. Astăzi evaluarea cea mai probabilă — dar neverificată încă nici pe departe — a concentrării acestui gaz ne dă o valoare de ordinul

a $10^{-5} \dots 10^{-6}$ atomi / cm³ (gazul intergalactic este aproape în întregime ionizat). Interacţiunea radiaţiei cosmice cu radiaţia optică şi cu gazul generează radiaţii gamma. Studiul lor este una dintre metodele principale de cercetare a spaţiului intergalactic. Din păcate, în momentul de faţă, urmînd această cale, încă nu putem demonstra că intensitatea componentei protoni-nuclee a radiaţiei cosmice intergalactice este sensibil mai mică decît intensitatea ei în Galaxie.

Originea radiaţiei cosmice

Cum se pune problema. Diversele modele. Unde se formează radiaţiile cosmice care se observă în vecinătatea Pămîntului? Ce volum ocupă ele? Cum, prin ce procese se accelerează radiaţiile în Galaxie şi în afara ei? Cercetarea originii radiaţiei cosmice în sensul propriu al cuvîntului este legată de toate aceste chestiuni.

Pentru o serie de motive, între altele din cauza lipsei de date provenite din observaţii, este deosebit de greu să analizăm cu certitudine mecanismul accelerării radiaţiei cosmice şi în general procesele care au loc în interiorul surselor. Din ferire, pentru rezolvarea altor probleme legate de originea radiaţiei cosmice se poate face mult chiar fără să cunoaştem amănunte privind procesele care au loc în surse. Pentru a calcula traiectoria zborului unui proiectil trebuie să cunoaştem viteza lui la ieşirea din ţeava tunului, dar nu este important să ştim cum s-a accelerat proiectilul în interiorul ţevii. La fel, dacă avem informaţii destul de complete despre radiaţia cosmică, de pildă, în anvelopa unei supranove, aceste informaţii pot fi valorificate fără să cunoaştem în ce fel se produce accelerarea particulelor atunci cînd supranova explodează.

Lăsînd la o parte pentru moment problema mecanismului accelerării, să ne îndreptăm atenţia asupra istoriei radiaţiilor cosmice care se observă în vecinătatea Pămîntului. Ne vom interesa de partea lor esenţială, fără a lua în seamă faptul că un număr mic de particule relativ moi se accelerează în Soare, iar particulele cu energii foarte mari (avînd de pildă $E \gtrsim 10^{18}$ eV) ne parvin, poate, din metagalaxie.

Există câteva variante ale teoriei originii radiației cosmice sau mai exact (întrucât cuvântul „teorie” este prea pretențios în cazul de față) s-au propus câteva modele pentru interpretarea fenomenelor observate. Dacă lăsăm la o parte modelele care prezintă doar un interes istoric (de pildă modelul solar), modelele principale sînt cele galactice și cele metagalactice (tabelul 2). În modelele de primul tip, radiația cosmică pe care o observăm în vecinătatea Pămîntului se formează în cadrul Galaxiei, în timp ce în modelele de tipul al doilea ea are origine metagalactică și pătrunde în Galaxie din afară.

Tabelul 2

Originea părții principale a radiației cosmice care se observă în vecinătatea Pămîntului

Modele galactice		Modele metagalactice	
Modele cu asista- ționare (model de halou sau model cu disc radio)	Alte modele	Model omogen (univer- sal)	Modele locale

Modelul originii radiației cosmice încă nu a fost ales definitiv, din care cauză trebuie să luăm în considerare diferite posibilități.

Modelul metagalactic omogen și cel local. Pentru ca radiația cosmică galactică să aibă o origine metagalactică trebuie să fie satisfăcută o condiție foarte stringentă. Anume, pentru aceasta este necesar ca intensitatea radiației cosmice în spațiul metagalactic, cel puțin în vecinătatea Galaxiei, să fie suficient de mare. Dacă mai ținem seamă că radiația cosmică metagalactică, ca și radiația care se observă în Galaxie, trebuie să fie practic izotropă (vezi amănunte mai jos), putem ajunge la condiția $w_{\text{metagalactic}} \approx w_{\text{galactic}} \approx 10^{-12} \text{ erg/cm}^3$.

Cu alte cuvinte, în modelele metagalactice densitatea energiei (și intensitatea) radiației cosmice trebuie să fie aproximativ aceeași și în Galaxie, și în metagalaxie.

De fapt, este o condiție asemănătoare cu cea care apare atunci cînd un bazin se umple cu apă dintr-un lac. Dacă nu avem pompă, nivelul de apă din bazin nu poate depăși nivelul din lac. Or, după cîte știm, nu există o pompă care „să pompeze” eficient și constant radiația cosmică din spațiul metagalactic în Galaxie. Notăm în legătură cu aceasta că în modelele galactice radiația cosmică se formează în Galaxie și, bineînțeles, se poate scurge și se va scurge din ea, și anume cu atît mai repede cu cît în spațiul intergalactic există o cantitate mai mică de radiație cosmică.

În modelul metagalactic omogen sau universal se admite că $w_{\text{metagalactic}} \approx w_{\text{galactic}}$ în tot spațiul metagalactic pe distanțe de miliarde de ani-lumină. O asemenea ipoteză întîmpină numeroase obiecții, dintre care vom enunța două mai importante.

În primul rînd, greu se poate înțelege cum „se umple” spațiul metagalactic cu o cantitate atît de uriașă de radiație cosmică. Evaluările menționate mai sus arată că galaxiile, radiogalaxiile și quasarii, dacă nu recurgem la ipoteze artificiale mult prea complicate, nu pot „furniza” atîtea particule; probabil că ele dau cel puțin un număr de 1 000 de ori mai mic de particule (adică $w_{\text{metagalactic}} \approx 10^{15} \text{ erg/cm}^3$). Evaluarea cantității de radiație cosmică remanentă care ar putea să fi apărut în stadiul de formare impetuoasă a galaxiilor (care a avut loc cu 7—8 miliarde de ani în urmă și mai înainte) duce de asemenea la o concluzie analogă (ce-i drept, această concluzie este ceva mai puțin convingătoare în cazul modelului cosmologic al lui Lemaître).

În al doilea rînd, s-a demonstrat că în metagalaxie sînt puțini electroni, deoarece ei pierd energie în cîmpul de radiație termică (vezi mai sus). Este deci incontestabil că componenta electronică a radiației cosmice din Galaxie se formează în Galaxie sau cel puțin în apropierea ei. Dar aceasta înseamnă că în modelul metagalactic omogen trebuie să atribuim electronilor și componentei protoni-electroni o origine cu totul diferită. Totodată, dacă modelul galactic în sine poate explica apariția componentei electronice, el este apt și pentru a explica apariția componentei protoni-nuclee, dar cu prețul unei ipoteze suplimentare la care ne vom referi mai jos.

În modelele metagalactice locale se consideră că radiația cosmică observată în vecinătatea Pămîntului se formează undeva în vecinătatea Galaxiei, de pildă în radiogalaxia Centaur A,

cea mai apropiată de noi (distanța până la ea este de 10^{25} cm = 10^7 ani-lumină) sau într-o regiune oarecare, fie chiar mare ($R \approx 10^{26}$ cm), dar totuși considerabil mai mică decât distanța metagalactică caracteristică $R_{\text{metagalactică}} \approx 5 \cdot 10^{27}$ cm. Dificultățile energetice pe care le întâmpină modelele locale nu sînt mai mici decât în cazul modelului omogen. În ceea ce privește explicarea apariției componentei electronice, în modelele locale lucrurile stau întrucîtva mai simplu decât în modelul omogen, dar dificultățile rămîn totuși mari.

În sfîrșit, să menționăm că nu există nici un fel de date directe provenite din observație care să poată fi invocate în favoarea modelelor metagalactice. După părerea mea, faptul acesta în sine este un argument împotriva modelelor metagalactice, deoarece inexistența unor argumente în favoarea unei ipoteze științifice reprezintă un argument serios împotriva ei.

Foarte mulți oameni de știință nu sînt însă de acord cu acest principiu, care nici nu poate fi considerat obligatoriu. Mai mult decât atît. În cazul problemei discutate aici, ca și într-o serie de alte cazuri, în astronomie este aplicat adesea un alt principiu care poate fi formulat cam în felul următor: „Cîtă vreme inexactitatea unei ipoteze nu este demonstrată, aceasta înseamnă că, chiar în lipsa unor date furnizate de observație în favoarea ei, această ipoteză trebuie considerată ca avînd aceleași șanse de valabilitate ca și altele“. Oricum ar fi, nu putem considera ca fiind infirmate toate modelele metagalactice. De aceea discutarea lor trebuie să continue. Sînt de părere totuși că modelul galactic este incomparabil mai probabil, deși nu a fost demonstrat în mod riguros.

Modelele galactice. În cadrul modelelor galactice, prin ipoteză cea mai mare parte a radiației cosmice prezente în Galaxie se formează tot în Galaxie. Trebuie concretizate în primul rînd volumul ocupat de radiația cosmică, durata vieții ei în acest volum și, în sfîrșit, sursele radiației cosmice. Să indicăm de la bun început un model galactic care pînă nu demult ni se părea a fi modelul cel mai probabil (tabelul 3), iar apoi să discutăm unele posibilități alternative. Se presupune că radiația cosmică umple mai mult sau mai puțin uniform zona discului radio, precum și a haloului. Desigur, concentrarea lor scade treptat cu distanța, totuși dimensiunea caracteristică a zonei ocupate este egală cu $(3 \dots 5) \cdot 10^{22}$ cm. Așadar, în acest model, la un volum $V \approx 10^{63}$ cm³, energia totală a radiației cosmice în Galaxie este $W_{rc} \approx$

$\approx w_{rc} V \approx 10^{56}$ erg, deoarece valoarea caracteristică a densității energiei este $w_{rc} \approx 10^{-12}$ erg/cm³. Radiația cosmică pierde energie și ca urmare a ciocnirilor în mediul interstelar. Dar și mai importantă (din punctul de vedere al echilibrului numărului de particule) este ieșirea lor din sistem. Diversele evaluări arată că durata de viață caracteristică radiației cosmice în Galaxie este $T \approx 3 \cdot 10^8$ ani $\approx 10^6$ s.

Tabelul 3

Modelul galactic cu halou

Raza (dimensiunea caracteristică a regiunii ocupate de radiația cosmică) $R \approx (3 \dots 5) \cdot 10^{22}$ cm. Volumul $V = R^3 \approx 10^{63}$ cm³. Energia radiației cosmice $W_{rc} \approx w_{rc} V \approx 10^{56}$ erg. Timpul de ieșire a particulelor din sistem $T \approx 3 \cdot 10^8$ ani = 10^{16} s. Puterea surselor $U \approx W_{rc}/T \approx 10^{40}$ erg/s. Imaginea este cvasistaționară (modificarea intensității medii în sistem este mai mică de 10–20% într-un timp de ordinul a 10^8 ani). Pentru componenta electronică: $W_e \approx 10^{54}$ erg, $T_e \approx 10^8$ ani, $U_e \approx W_e/T_e \approx 3 \cdot 10^{38}$ erg/s. Sursele principale de radiație cosmică sînt supernovele (este posibil să aibă un rol și novele, ca și „micile“ erupții ale nucleului galactic).

Avem motive să credem că intensitatea radiației cosmice în Galaxie a variat prea puțin în ultimele miliarde de ani. Dacă lucrurile stau într-adevăr astfel, sursele de radiație cosmică trebuie să compenseze în permanență pierderile și puterea lor să fie $U \approx W_{rc}/T \approx 10^{40}$ erg/s. Această putere este foarte mare, deși e posibil ca ea să aibă chiar un ordin de mărime superior cu o unitate, din care cauză alegerea surselor trebuie făcută cu multă exigență.

Este suficient să spunem că Soarele generează radiație cosmică cu o putere medie $U_s \approx 10^{24}$ erg/s. De aici rezultă că chiar dacă toate stelele din Galaxie (numărul lor fiind de ordinul a 100 de miliarde) ar fi surse de radiație cosmică la fel ca Soarele, ele ar furniza o putere de numai $10^{35} \dots 10^{36}$ erg/s. Afară de aceas-

ta, componența chimică și spectrul energetic al radiației cosmice solare se deosebesc esențial de cele care se observă în cazul radiației cosmice galactice.

Bineînțeles, există stele mult mai active decât Soarele. Dar numărul lor nu este prea mare. În general vorbind, ipoteza cu privire la originea stelară a radiației cosmice (avîndu-se în vedere stelele care nu explodează) este evident neverosimilă.

Altfel stau lucrurile dacă luăm în considerare explozia supranovelor: cu acest prilej are loc eliberarea unor energii care ating 10^{51} , iar după unele evaluări și 10^{53} erg. În Galaxie supranovele apar în medie o dată la 30 de ani (respectiv 10^8 s) și deci puterea medie a degajării energiei în supranove se ridică la $(10^{51} \dots 10^{53}) \cdot 10^{-9}$, adică $10^{42} \dots 10^{44}$ erg/s.

Această evaluare a energiei degajate a făcut să apară încă înainte de nașterea radioastronomiei ipoteza că tocmai supranovele generează radiația cosmică pe care o observăm în vecinătatea Pământului. Acum știm (acest lucru a fost elucidat în 1950 — 1953) că radiația cosmică, sau cel puțin componenta ei electronică, este efectiv generată în timpul exploziei supranovelor. Datele estimative citate ne îndreptătesc să considerăm că în medie în timpul exploziei unei supranove se transformă în radiație cosmică 10^{49} erg, ceea ce ne conduce la o putere $U_{supranova} \approx 10^{49}/30 \cdot 3 \cdot 10^7 \approx 10^{40}$ erg/s, care coincide cu cea presupusă. Bineînțeles, nu trebuie să atribuim o importanță prea mare unei asemenea coincidențe a estimărilor, deoarece una dintre „legile” fizicii cosmice (fără îndoială nu totdeauna aplicabilă) este egalitatea $1 = 10$. Cu toate acestea, chiar și coincidența ordinelor de mărime este în acest caz cît se poate de remarcabilă și, incontestabil, ne dă dreptul să considerăm că supranovele pot pretinde locul de cînte ca sursă principală probabilă a radiației cosmice galactice. Mai mult decât atât, această sursă nu este numai probabilă, ci cea mai probabilă.

Un aport cît de cît apreciazabil ar putea aduce în principiu novele. Degajarea de energie care revine la o explozie a novei este cu cîteva ordine de mărime mai mică decât în cazul supranovelor, dar și numărul de izbucniri ale supranovelor în Galaxie este de cîteva mii de ori mai mare. Întrucît nu a fost încă descoperită radiația radio a novelor, este cel mai probabil ca eficiența lor în calitate de surse ale radiației cosmice să fie totuși considerabil mai mică decât a supranovelor.

O altă posibilitate, mai interesantă, este generarea radiației cosmice ca urmare a exploziilor nucleului galactic. Dacă aceste explozii ar fi foarte puternice, Galaxia noastră ar fi cel mai probabil o radiogalaxie, dar nu este cazul. Din acest motiv cît și din altele, este de presupus că sînt posibile și chiar probabile numai explozii „mici” ale nucleului galactic. Ele s-ar putea produce o dată la $10 - 100$ milioane de ani și în acest caz în radiația cosmică ar putea fi transferată o energie care să se ridice bunăoară la $W_{expl} \approx 10^{55}$ erg, totuși mai mică decât energia radiației cosmice din Galaxie $W_{rc} \approx 10^{56}$ erg. Puterea medie a radiației cosmice generate de explozii, în cazul repetării lor la fiecare $3 \cdot 10^7$ ani $\approx 10^{15}$ s ar fi $U_{expl} \approx W_{expl}/T_{expl} \approx 10^{40}$ erg/s. Dar aceasta nu este decât o ipoteză; în realitate nu există deocamdată informații directe asupra unei generări atît de puternice a radiației cosmice cu prilejul exploziilor din nucleul Galaxiei.

Afară de aceasta, datorită pierderilor foarte mari, o parte considerabilă a componentei electronice generate cu prilejul exploziei nucleului nu ar „supraviețui” pînă în zilele noastre. Or, tocmai studiul componentei electronice, a generării și propagării ei are în astrofizica radiației cosmice în mare parte rolul de „piatră de încercare”, deoarece tocmai cu privire la ea ne vin informații și de la mari depărtări de Pămînt.

Din acest punct de vedere supranovele satisfac toate exigențele și pot asigura evident o accelerație a electronilor care să dea o putere $U_e \approx 3 \cdot 10^{38}$ erg/s (vezi tabelul 3); durata medie de viață a electronilor în Galaxie poate fi considerată egală cu $T_e \approx 10^8$ ani, respectiv de vreo trei ori mai mică decât durata de viață a tuturor radiațiilor cosmice, datorită pierderilor prilejuite de radiația sincrotronă și de împrăștierea pe fotoni. Așadar trecerea de la modelul galactic al originii componentei electronice la un model asemănător pentru radiația cosmică în întregime presupune doar o singură ipoteză în plus: ipoteza că alături de electroni primesc o accelerație și protonii, și nucleele, și că energia totală ce se transferă în aceste particule este de 30 de ori mai mare decât cea care se transferă componentei electronice. Cu toate că această presupunere nu este demonstrată, ea este cît se poate de firească. Electronii suferă pierderi (de pildă, de natură sincrotronă) care practic nu există în cazul protonilor și al nucleelelor. De aceea, chiar dacă accelerația electronilor și a protonilor s-ar realiza cu o intensitate egală, după un

timp — de pildă după ieșirea particulelor din anvelopă în spațiul interstelar — energia componentei electronice s-ar dovedi mai mică. Afară de aceasta, în majoritatea mecanismelor de accelerație cunoscute, particulele grele primesc o energie mai mare decât particulele ușoare. Este cu mult mai greu să lămurim direct dacă nucleele și protonii sunt accelerați cu prilejul izbucnirilor supranovelor; totuși există în această privință anumite posibilități. Să ne referim, de pildă, la observarea radiației gamma emise cu prilejul dezintegrării mezonilor π^0 , pe care îi poate genera în anvelope radiația cosmică.

Celelalte modele (galactice) ale originii radiației cosmice sînt de două tipuri: modelul nestaționar și modelul cu disc. În modelul nestaționar se consideră că radiația cosmică pe care o observăm în prezent a rezultat dintr-o mare explozie a nucleului galactic. Ni se pare că nu există nici un temei pentru a admite o asemenea ipoteză. Dimpotrivă, ea întîmpină o serie de obiecții, dintre care unele au fost menționate mai sus.

În modelul cu disc se consideră că radiația cosmică umple nu un volum cvasisferic cu raza $R \approx (3 \dots 5) \cdot 10^{22}$ cm, ci, în linii mari, o zonă a discului radio (cu raza $R \approx 5 \cdot 10^{22}$ cm și cu o grosime $h \approx 2 \cdot 10^{21}$ cm). Într-un asemenea model durata de viață a radiației cosmice în sistem este considerabil mai mică decât în modelul cu halou cvasisferic. Timpul scurt de viață $T \approx (1 \dots 3) \cdot 10^6$ ani reprezintă tocmai deosebirea caracteristică dintre modelul cu disc radio și modelul cu halou, în care $T \approx (1 \dots 3) \cdot 10^8$ ani.

După cum s-a mai arătat, problema volumului ocupat de radiația cosmică cu o densitate a energiei $w_{rc} \approx 10^{-12}$ erg/s rămîne deschisă. Pe de o parte nu vedem cauze care să împiedice radiația cosmică să „dilate” discul radio și să formeze un halou. Pe de altă parte însă, acest halou ar fi o capcană proastă pentru radiațiile cosmice; ca urmare, densitatea energiei lor ar avea valori apreciabile numai în regiunea discului radio. În această privință, cuvîntul hotărîtor revine, bineînțeles, observației. De pildă, dacă s-ar reuși să se demonstreze existența haloului radio, modelul cu halou (vezi tabelul 3) ar primi o confirmare convingătoare. Afară de aceasta, durata de viață a radiației cosmice poate fi evaluată atît după datele privind conținutul izotopilor radioactivi în ele (vezi paragraful în care s-a vorbit de izotopul ^{10}Be), cît și după spectrul electronilor și al pozitronilor.

În ultimul timp, în anul 1969, au apărut unele indicații care ne permit să afirmăm că durata de viață a radiației cosmice este $\lesssim 10^7$ ani, ceea ce reprezintă un argument împotriva modelului cu halou și în favoarea modelului cu disc. Cu toate acestea, valabilitatea modelului cu halou nu este în nici un caz exclusă, fără să mai vorbim despre eventualitatea unei soluții de compromis care ar considera ca regiune ocupată de razele cosmice un disc radio cu o grosime mare sau un halou aplatizat avînd volumul $V \approx \pi R^2 h \approx 3 \cdot 10^{67}$ cm³, unde $R \approx 5 \cdot 10^{22}$ cm și $h \approx 5 \cdot 10^{21}$ cm. Puterea surselor în modelul cu disc radio trebuie să fie aproximativ aceeași ca și în modelul cu halou: ($U \approx 10^{40}$ erg/s, $U_e \approx 3 \cdot 10^{38}$ erg/s (vezi tabelul 3). Așadar, din punctul de vedere al condițiilor pe care trebuie să le îndeplinească sursele de radiație cosmică, ambele modele sînt echivalente. De aceea, considerațiile de mai sus în favoarea concluziei că principalele surse ale radiației cosmice sînt supranovele își păstrează valabilitatea și pentru modelul cu disc. Alegerea între modelul cu halou și modelul cu disc este în momentul de față una din cele mai actuale probleme.

Accelerarea radiației cosmice. Efectele de plasmă. Am ocolit mai sus întrebarea în ce fel se accelerează radiația cosmică și am și explicat de ce în unele cazuri se poate proceda astfel. Cu toate acestea, problema mecanismului accelerării particulelor în condițiile cosmice se pune, și ea stîrnește în mod firesc un interes deosebit pentru cercetători. Pentru a o examina temeinic ar fi nevoie de o lucrare specială. Aici ne vom limita doar la cîteva observații.

Substanța din cosmos — cu puține excepții (planetele, pulberea) — se află în stare ionizată, respectiv în stare de plasmă. Așadar, primul element al oricărui sistem accelerator: sursa particulelor încărcate (de pildă, un tun ionic) poate fi găsită, în condițiile cosmice, practic pretutindeni. Particulele sînt accelerate de un cîmp electric, și asemenea cîmpuri, care constituie cel de-al doilea element al oricărui dispozitiv accelerator, apar de asemenea în cosmos în mod frecvent.

Plasma este foarte mobilă; în ea apar diverse mișcări, declanșate de mai multe cauze; ea poate fi străbătută de fluxuri de particule. Or, mișcarea într-un mediu bun conducător de curent electric (iar plasma cosmică are o conductibilitate

foarte mare) duce la apariția de curenți. Acești curenți generează câmpuri magnetice. Modificarea câmpului magnetic, în virtutea legii inducției electromagnetice, duce la apariția unui câmp electric. Câmpurile electrice „funcționează” și în cazul ciocnirii particulelor încărcate și se manifestă de asemenea în undele care se propagă în plasmă. În felul acesta devine clar de ce accelerarea particulelor în condițiile cosmice nu trebuie considerată o excepție, ci o regulă. Misiunea acceleratoarelor cosmice este ușurată de faptul că ei pot accelera până la energii foarte mari numai un număr de particule infim față de totalitatea lor.

Să amintim că în vecinătatea Pământului concentrația radiației cosmice este de ordinul 10^{-10} cm^{-3} , adică cu 10 ordine de mărime (de zece miliarde de ori) mai mică decât concentrația tipică a gazului interstelar. De aceea în cosmos par să aibă un mare rol mecanismele statistice de accelerare (după câte știu, pentru prima dată un mecanism de acest tip a fost sugerat în 1949 de E. Fermi).

Unul dintre cele mai simple mecanisme statistice se prezintă astfel: particula încărcată se mișcă în câmpuri electrice slabe și haotice, existente într-o regiune oarecare (de pildă în atmosfera unei stele). Într-un asemenea câmp haotic, particula ba se accelerează, ba se încetinește, după cum se mișcă în sensul câmpului sau în sens contrar. Ca urmare, pentru majoritatea particulelor, în decursul unei perioade îndelungate energia se modifică puțin sau nu se modifică deloc. Unele particule pot avea însă „noroc”. Ele se mișcă întâmplător, în așa fel încât tot timpul (sau în majoritatea cazurilor) sînt în fază cu câmpul, deplasîndu-se în sensul câmpului. În acest caz energia particulelor crește, și dacă timpul e suficient poate lua proporții foarte mari. Desigur, asemenea particule sînt într-un număr mai mic decât bunăoară acela al câștigătorilor norocoși la loterie. Am putut însă să ne dăm seama că în general particulele radiației cosmice pot fi comparate cu asemenea jucători norocoși.

Există însă și alte mecanisme în stare să asigure accelerarea unui număr însemnat de particule. Astfel, după cum a arătat deosebit de convingător S. I. Sirovatski, atunci cînd se modifică configurația unor câmpuri magnetice (de pildă a câmpului din regiunea unor grupuri de pete solare) se poate accelera

deosebit de activ un strat întreg de plasmă. Un asemenea mecanism este denumit uneori cumulativ (vezi anexa).

Accelerarea particulelor este posibilă și în frontul puternicelor unde de șoc care se propagă din partea centrală a stelelor spre suprafața lor. Acest mecanism a fost propus în 1960 de S. Colgate și M. Johnson. În felul acesta însuși faptul accelerării particulelor în condițiile cosmice este cît se poate de natural.

Ceea ce preocupă acum pe cercetători este altceva: examinarea concretă a accelerării, de pildă în cazul izbucnirii unei supernove sau în anvelopa ei. Această problemă nu a fost încă pe deplin rezolvată, în primul rînd din cauza lipsei de informații necesare cu privire la detaliile procesului de explozie. Studiul radiației cosmice, de pildă a componentei și spectrului ei în sursă, va constitui una dintre modalitățile prețioase de obținere a informației, permițîndu-ne să alegem un model sau altul de explozie, respectiv un mecanism sau altul de accelerare în timpul exploziei.

Efectele de plasmă sînt importante nu numai în procesul de accelerare a radiației cosmice, ci și în mișcarea ei prin mediul interstelar și intergalactic. Un fascicul de particule care străbate plasma este instabil; el generează diverse unde. Acțiunea inversă a acestor unde asupra fascicului duce la modificări în distribuția particulelor în fascicul după viteze și direcții.

Caleculile estimative arată că chiar în spațiul intergalactic plasma cosmică mai este suficient de densă pentru ca destrămarea fascicului de radiații ca urmare a instabilității menționate să se petreacă foarte repede, nu numai comparativ cu duratele caracteristice ale evoluției galaxiilor (miliarde de ani), ci și cu durata caracteristică a exploziei nucleului galactic (un milion de ani sau mai puțin). În această ordine de idei, putem înțelege și cauza caracterului izotrop al radiației cosmice: distribuția ei anizotropă (de pildă într-un fascicul de particule) este instabilă și trece repede într-o distribuție izotropă. Ce-i drept, caracterul izotrop al radiației în vecinătatea Pământului se poate explica pur și simplu prin faptul că radiațiile cosmice rătăcesc prin câmpuri haotice și „uită” direcția vitezei lor inițiale. În realitate acționează, probabil, ambele mecanisme de izotropizare a radiației cosmice.

Existența mecanismului de plasmă legat de instabilitatea fasciculelor ne oferă însă garanția faptului că radiația cosmică este practic izotropă aproape pretutindeni și totdeauna în

anvelopele supranovelor, în galaxii, în radiogalaxii și în spațiul intergalactic.

Faptul că mediul cosmic nu este un gaz rarefiat format din particule neutre, ci plasmă, care posedă o serie întreagă de proprietăți specifice și „colective“ este important și pentru înțelegerea unei serii de alte fenomene care își cer rezolvarea în astrofizica radiației cosmice.

Observații finale. Modelul galactic evasistationar pare să fie schema cea mai probabilă care explică originea radiației cosmice observate în vecinătatea Pământului. Până nu de mult autorul considera că modelul cu halou este cu mult mai plauzibil în comparație cu modelul cu disc. Astăzi, poziția modelului cu disc s-a consolidat și este posibil ca el „să devanseze“ modelul cu halou. Dar lucrurile stau astfel cel puțin începând din anul 1953, ceea ce nu poate să nu provoace un anumit sentiment de insatisfacție. Un răstimp de 16 ani pare suficient pentru a confirma sau a infirma valabilitatea unui model. Totuși nu cred că această întârziere și rezolvarea problemei originii radiației cosmice se datorește unui ghinion deosebit. Explicația constă mai curând în faptul că această problemă ține de astronomia galactică și metagalactică.

Uriasele distanțe, condițiile neobișnuite din punctul de vedere terestru, dificultatea obținerii de informații, iată cauzele care fac ca verificarea ipotezelor din acest domeniu să fie deosebit de grea. Probabil că tocmai de aceea se naște ispita de a oferi ceva cu totul nou și neobișnuit, cum ar fi posibilitatea generării substanței noi „din nimic“ (ceea ce se admite în cosmologia staționară) sau expulzarea quasarelor din nucleeele galactice.

Discutarea largă a unor ipoteze atât de radicale în literatura științifică și la întâlnirile oamenilor de știință reflectă într-o anumită măsură starea actuală a astronomiei, nelămuririle care persistă într-o serie de probleme astronomice fundamentale. Cât timp va dăinui această situație nu vom putea, probabil, să considerăm ca fiind definitiv demonstrată valabilitatea unui anumit model al originii radiației cosmice. Trebuie spus însă că în zilele noastre situația din astronomie se schimbă cu repeziciune. Au apărut și sînt folosite pe o scară tot mai mare canale noi de informație, se perfecționează metodele vechi. De aceea cred că în anii următori domeniul în care va mai putea să con-

tinue jocul liber al imaginației se va deplasa cu mai multe miliarde de ani înapoi.

De altfel, pentru rezolvarea problemei originii radiației cosmice ar fi suficiente, probabil, și succese mai modeste: determinarea vârstei radiației cosmice după conținutul în izotopi radioactivi de tipul ^{10}Be , precizarea spectrului componentei electronice, determinarea semnului anizotropiei radiației cosmice, stabilirea formei și dimensiunilor haloului galactic, măsurarea fluxului de raze gamma metagalactice.

În toamna anului 1966, la simpozionul consacrat structurii Galaxiei care a avut loc la Noordwijk, în Olanda, am spus, între altele, că „sper să mai fiu în viață în momentul victoriei depline a teoriei galactice“.

H. Alfvén a parat imediat: „În cazul acesta sper că veți avea o viață foarte lungă“. El însuși a propus la timpul său un model în care radiația cosmică ce se observă în vecinătatea Pământului ia naștere în principal în Soare. Și nu a renunțat la acest model nici astăzi.

Aș fi bucuros dacă profesorul Alfvén s-ar dovedi un bun profet în problemele longevității. Cît despre modelul galactic al originii radiației cosmice, îmi asum riscul de a-mi exprima încrederea că problema va fi definitiv rezolvată în următorii 5 sau cel mult 10 ani.

Anexă

Unele probleme teoretice privind originea radiației cosmice

În textul lucrării autorul se adresa, bineînțeles, unui cerc de cititori care nu cunoaște sau nu cunoaște decît puțin astrofizica și în special astrofizica radiației cosmice. De aceea a trebuit nu numai să se oprească asupra situației actuale a problemei și asupra datelor noi, ci și să explice terminologia adoptată etc. O asemenea dublare a obiectivelor are de obicei ca urmare faptul că cititorilor le vine greu să separe ceea ce este de mult cunoscut sau stabilit cu certitudine de ceea ce nu este suficient de clar, și să-și facă o idee despre obiectivele apropiate ale științei. Pentru a compensa această lipsă,

în ANEXĂ expunem un rezumat al comunicării pregătite de S.I. Sirovatski și de autorul acestei lucrări pentru conferința unională privitoare la fizica radiației cosmice care s-a desfășurat la Tashkent în 1968. Comunicarea a fost prezentată la 7 octombrie 1968 și publicată în „Buletinul Academiei de Științe a U.R.S.S.” (Izvestia AN SSSR), seria Fizică.

În teoria originii radiației cosmice se pot distinge două direcții principale, vizînd problema „externă” și cea „internă”. De prima ține tot ce se petrece în afara surselor, adică probleme generale, cum ar fi rolul radiației cosmice metagalactice, originea și regiunea de acumulare a părții principale a radiației cosmice care se observă în vecinătatea Pămîntului, sursele ei posibile, legătura dintre diversele componente (protonii, nucleeele, electronii, radiațiile gamma etc.), rolul radiației cosmice în dinamica mediului interstelar și caracterul mișcării ei în Galaxie. Obiectul problemei „interne” îl constituie sursele înseși ale radiației cosmice, și în primul rînd procesele care duc la accelerarea radiației cosmice și la formarea spectrului ei energetic, ca și componenta chimică în surse.

Încercările de a rezolva problema externă se bazează în primul rînd pe datele privind radiația cosmică primară în vecinătatea Pămîntului, datele astrofizicii, ale radioastronomiei, ale astronomiei gamma și Roentgen. În ultimii ani situația nu s-a schimbat decît foarte puțin în acest domeniu. Se pare că teoria cea mai consecventă este teoria galactică a originii părții principale a radiației cosmice care se observă în vecinătatea Pămîntului. Ne vom opri numai asupra elementelor principale ale acestei teorii.

1. Partea covîrșitoare a radiației cosmice observate se formează în cadrul Galaxiei; contribuția particulelor metagalactice (poate cu excepția particulelor cu energii foarte mari) este neglijabilă. Această afirmație este riguros demonstrată pentru electroni (nivelul scăzut al radiației Roentgen și al radiației gamma a metagalaxiei) și pare aproape certă — pe baza unor considerente energetice — și pentru componenta protoni-nuclee. Argumentul hotărîtor ar fi măsurarea fondului de radiație gamma provenită din metagalaxie și care se produce prin interacțiunea radiației cosmice cu gazul intergalactic.

Să admitem, așa cum se face de cele mai multe ori, că construcția gazului intergalactic este $n \approx 10^{-5} \text{ cm}^{-3}$; atunci intensitatea așteptată a fondului de radiație gamma cu o energie mai

mare de 50 MeV este $I_\gamma = 5 \cdot 10^{-4} \xi \text{ foton/cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sterad.}$, unde ξ este raportul dintre concentrația radiației cosmice metagalactice și a celei observate în vecinătatea Pămîntului. Potrivit ultimelor date, intensitatea fondului de radiație gamma cu o energie mai mare de 50—70 MeV nu depășește $(1,1 \pm 0,2) 10^{-4} \text{ foton/cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sterad.}$ Ținînd seama de imprecizia calculelor și de valoarea concentrației n , rezultă că de aici nu se poate trage încă concluzia că $\xi \ll 1$, dar aceasta este întru totul posibil.

O direcție importantă o reprezintă cercetările privitoare la radiația cosmică de energie foarte mare și la limita superioară a spectrului ei. Fluxul neașteptat de mare $I(E > 5 \cdot 10^{19} \text{ eV}) \approx 0,06 \text{ particulă/km}^2 \cdot \text{an} \cdot \text{sterad.}$, care corespunde unor informații, poate fi o mărturie că sursele acestor particule se află aproape (poate chiar în Galaxie).

2. Este posibil ca și în Galaxie radiațiile cosmice să ocupe un volum evasiferic care să includă un halou. O demonstrație directă ar fi decelarea certă a haloului radio al Galaxiei noastre. Cu toate îndoielile exprimate, în ultimele lucrări s-a arătat că imaginea unui halou radio concordă cu datele radioastronomice și în orice caz nu se află în contradicție cu ele¹.

3. Sursele principale ale radiației cosmice în Galaxie sînt izbucnirile supranovelor. Această concluzie este confirmată de ultimele date privind frecvența mare a izbucnirilor — cam 1 la 30 de ani —, precum și de prezența unor electroni de mare energie (de ordinul a sute de GeV) care trebuie să se fi produs în niște surse apropiate și nu în nucleul galactic, de pildă. Rolul acestuia din urmă nu este deocamdată clar, dar puternica radiație gamma provenită din regiunea centrală a Galaxiei și descoperită recent poate fi o mărturie a unui ritm mai înalt de generare a radiației cosmice în vecinătatea nucleului.

4. În Galaxie radiația cosmică străbate un strat de substanță cu densitate superficială egală cu $(3 \dots 6 \text{ g/cm}^2)$ și părăsește volumul lui într-un timp de $(1 \dots 3) \cdot 10^8$ ani. Pentru precizarea acestor cifre este foarte important să se continue analiza chimică și analiza pe bază de izotopi a componentei radiației cosmice, folosindu-se informații mai detaliate privind secțiunile eficace nucleare. O asemenea analiză ne va da, pe lângă aceasta, posibilitatea de a limita numărul modelelor admisibile pentru

¹ Pe de altă parte, unele rezultate noi în domeniul radiației cosmice pledează mai curînd în favoarea modelului cu disc radio (vezi mai sus).

distribuția surselor și pentru mișcarea radiației cosmice în Galaxie.

5. Electronii care produc radiația în domeniul radio și care formează componenta electronică a radiației cosmice se accelerează direct în surse, aportul electronilor secundari fiind mic, ceea ce rezultă din datele referitoare la spectrul, intensitatea și numărul pozitronilor. Datele cu privire la electronii primari din vecinătatea Pământului sînt în ansamblu în concordanță cu datele radioastronomice referitoare la intensitatea radiației radio a Galaxiei. Precizarea în continuare a calculelor ne permite în principiu să evaluăm distribuția surselor de radiații cosmice și repartizarea cîmpului magnetic în Galaxie.

6. Mișcarea radiației cosmice are un caracter de difuziune. În acest proces au un rol important efectele de plasmă, între altele declanșarea undelor de către fluxul anizotrop de radiație cosmică. Chiar și o anizotropie neînsemnată a radiației cosmice egală cu aproximativ 0,1% se poate dovedi suficientă pentru antrenarea undelor magneto-hidrodinamice și împrăștierea radiației cosmice pe aceste unde, ceea ce duce la izotropizarea lor și o difuzie lentă de-a lungul cîmpului.

Așadar, argumentele principale ale teoriei galactice a originii radiației cosmice au rezistat, după părerea noastră, la proba timpului. Ele au primit noi confirmări experimentale și teoretice.

În prezent, centrul de greutate al cercetărilor se deplasează pe de o parte în direcția unei teorii cantitative mai detaliate privind componența chimică, difuzia, radiația radio a componentei electronice, în legătură cu alte tipuri de radiație (radiația gamma, Roentgen); pe de altă parte a devenit actuală și au apărut condiții pentru o cercetare mai concretă a problemei „interne”, respectiv a teoriei surselor radiației cosmice. Este cazul să ne referim aici la următoarele fapte:

caracterul universal al accelerării particulelor în condițiile cosmice (magnetosfera Pământului, Soarele, stelele care erup și galaxiile);

marea eficiență a accelerației electronilor; într-o serie de cazuri, de pildă, pentru nebuloasa Crabul, pentru Galaxie și, probabil, pentru majoritatea radiosurselor spectrul energetic al electronilor din surse este mai „dur” decît spectrul protonilor și al nucleelor;

precizarea componenței chimice a radiației cosmice în surse, destul de apropiată, de altfel, de răspîndirea naturală a elementelor în univers.

Toate faptele de mai sus impun anumite limite mecanismului de accelerare a radiației cosmice.

Să examinăm pe scurt acest cerc de probleme.

În alegerea mecanismelor concrete ale accelerării are o importanță hotărîtoare problema „injecției”, respectiv a felului cum particulele plasmă din sursă intră în procesul de accelerare. Întrucît particulele care se accelerează reprezintă doar o mică parte din substanța din sursă, selecția lor se poate desfășura numai pe una din următoarele căi:

se accelerează numai particulele care se deosebesc prin anumite proprietăți, de pildă, prin energii mari în condițiile distribuției termice inițiale;

se accelerează toate particulele încărcate, dar numai în unele porțiuni mici ale volumului sursei.

De obicei, examinîndu-se mecanismul statistic al accelerării se ia în considerare prima posibilitate. Dar o analiză mai atentă arată că în acest caz există o mare selectivitate față de tipul particulelor: se accelerează mai ales nucleele grele, iar accelerarea electronilor de mari energii este în general nu prea activă. Cu toate că accelerarea nucleelor grele pare să se realizeze mai ales în unele cazuri (conținutul mărit al elementelor grele în radiația cosmică primară, cazurile de creștere a numărului de nuclee grele în radiația cosmică solară), totuși pentru masa de bază a radiațiilor cosmice solare și galactice este caracteristică o compoziție apropiată de răspîndirea naturală a elementelor în univers.

În legătură cu cele arătate prezintă un mare interes cea de-a doua posibilitate care se realizează în condițiile accelerării cumulative în apropierea liniilor nule ale cîmpului magnetic, respectiv a liniilor în care cîmpul magnetic este egal cu zero.

Un exemplu tipic de procese legate de o asemenea accelerare sînt erupțiile solare. Radiația cosmică solară care se produce în timpul erupțiilor (dacă alegem ca variabilă independentă „duritatea” magnetică) are o compoziție care corespunde cu compoziția atmosferei solare și posedă spectre energetice asemănătoare pentru diversele componente încărcate. Tocmai

aceste proprietăți sînt caracteristice pentru mecanismul cumulativ care accelerează toate particulele pînă la durități egale¹.

Fotografiile Roentgen recent obținute ale unei erupții solare cu ajutorul unor aparate cu o mare putere de rezoluție (pînă la două secunde), au arătat că accelerarea se produce într-adevăr în apropierea liniei nule, iar structura dublă a zonei radiante, care se observă, corespunde imaginii teoretice a apariției a două paralele la linia nulă a filamentelor compactizate. În general trebuie să menționăm să Soarele și magnetosfera Pămîntului sînt cele mai bune regiuni pentru studiul mecanismului cumulativ și pentru verificarea teoriei lui. Explicația constă în faptul că pentru alte obiecte nu dispunem de o informație cît de cît comparabilă sub raportul volumului și al caracterului detaliat cu privire la procesele și condițiile în care ele decurg.

Accelerarea foarte eficientă a electronilor pe care o demonstrează teoria se află în concordanță și cu datele despre radiația Roentgen și radio a erupțiilor, cu toate că compararea directă a numărului de protoni și electroni accelerați este îngreuiată din pricina pierderii rapide de către electroni a energiei lor încă în atmosfera Soarelui.

Așadar, astăzi există toate temeiurile pentru a considera că la baza fenomenului erupțiilor din cronosferă se află mecanismul acumulării magnetice în vecinătatea liniilor nule ale cîmpului. Acest mecanism pare să aibă o semnificație mai universală pentru astrofizică și se realizează oriunde există mișcări suficient de intense ale plasmei cosmice magnetizate, de pildă cînd magnetosfera este supusă acțiunii vîntului solar sau cu prilejul exploziei stelelor și a nucleelor galactice.

Cînd e vorba de radiațiile cosmice galactice, mecanismul cumulativ trebuie privit mai curînd ca un mecanism de injecție; în continuare accelerația este realizată prin mecanisme statistice de tip Fermi. În felul acesta se poate explica o serie de proprietăți ale surselor de radiații cosmice.

¹ „Duritatea” magnetică este proporțională cu impulsul particulei raportat la sarcina ei. În cazul mecanismului cumulativ accelerația este realizată de cîmpul electric care rezultă datorită modificării cîmpului magnetic și care acționează în același timp asupra tuturor particulelor (presupunindu-se că în timpul accelerării particulele nu apucă să evadeze din zona generării lor).

Să examinăm în acest scop o anvelopă cu un puternic cîmp magnetic și cu mișcări suficient de intense, care se formează, de pildă, cu prilejul exploziei unei supranove. În stadiul inițial, cînd este puternic resimțită mișcarea turbulentă, este posibilă o accelerare fără injecție a nucleelor grele ca urmare a mecanismului statistic direct din starea de echilibru termic. Acest stadiu poate fi răspunzător pentru excesul de elemente grele în componența radiației cosmice primare. Acest stadiu are însă o scurtă durată, deoarece accelerarea majorității nucleelor duce la o puternică disipare a mișcărilor turbulente și la scăderea parametrului accelerării $\alpha = \frac{dE/dt}{E}$ pînă la o valoare la care accelerarea fără injecție încetează. În continuare, accelerarea statistică este posibilă numai pentru particule a căror energie E depășește energia de prag a injecției E_{inj} .

În asemenea condiții este evident că pentru accelerarea unor particule noi este nevoie de o accelerare prealabilă (injecție) produsă de un alt mecanism. Dacă vom presupune că injecția necesară este asigurată de un mecanism cumulativ, se poate arăta că toate nucleele și toți protonii se accelerează pînă la aceeași energie pe nucleon. Așadar componența chimică a nucleelor accelerate la o anumită energie pe nucleon va caracteriza componența substanței în regiunea în care se produce accelerarea (în anvelopă). Faptul acesta explică de ce energia pe nucleon se dovedește a fi, după cum se pare, cel mai comod parametru cînd se face analiza componenței chimice a radiației cosmice primare.

În continuare, după cum se constată, energia electronilor accelerați este în general sensibil mai mică decît energia protonilor și de aceea în componența electronică, de regulă, este cuprinsă o energie considerabil mai mică decît în componența de protoni și de nuclee. Tocmai această situație se observă în sursele radiației cosmice primare. Cu timpul, pe măsura atenuării turbulentei și micșorării parametrului de accelerare (proces cărui îi corespunde creșterea energiei pragului de injecție E_{inj}), mai întîi încetează injecția protonilor, dar multă vreme mai continuă injecția și accelerarea electronilor. Se poate considera că tocmai această situație se observă în unele anvelope ale supranovelor, unde accelerarea electronilor continuă și în prezent, în timp ce injecția protonilor și a nucleelor pare să fi încetat.

Să menționăm, în sfârșit, că în cadrul schemei examinate pentru interpretarea spectrului energetic se dovedește fecundă ipoteza privitoare la egalitatea energiei radiației cosmice, a câmpului magnetic și a energiei cinetice a mișcărilor turbulente din surse. Totodată putem explica astfel caracterul spectrului observat al componentei de protoni și nuclee, cât și spectrul componentei electronice (din păcate nu putem da o expunere mai amănunțită a părții respective a articolului, care are un caracter ceva mai complicat).

Schema schițată cere, bineînțeles, o elaborare mai detaliată și o verificare. Totuși ea cuprinde de pe acum un număr considerabil de procese referitoare la radiația cosmică primară, eliminând o serie de dificultăți în interpretarea spectrului electronilor în vecinătatea Pământului și în surse și indicând direcțiile concrete de cercetare a proceselor de accelerare a particulelor în condițiile cosmice. În prezent, una din aceste direcții deosebit de importante este dezvoltarea și verificarea teoriei accelerării cumulative și a aplicărilor ei concrete. Ce-i drept, în urma descoperirii pulsarilor și a detectării lor în anvelopele unor supranove, o cale și mai promițătoare de analiză a problemei accelerării particulelor în aceste anvelope este examinarea mecanismului accelerării particulelor în pulsari (mai exact, în vecinătatea pulsarilor).

4

O mare descoperire : pulsarii

Odă pulsarilor

Radiosursă ce pulsezi neconținut,
Poți să ne spui ce forță te-a vrăjit
Și te-a făcut nemărginit de densă
Încît chemarea ți-e atîta de intensă ?¹

(„Science News“, Col. 93, nr. 24, 15 iunie 1968)

Astronomia, fizica și biologia, aceste trei mari domenii ale științelor naturii, par să se afle într-o continuă întrecere. Obiectivele acestei întreceri sînt numărul de descoperiri, caracterul lor și importanța lor pentru știință și tehnică. Rolul de recompensă pentru performanțe îl au interesul și sprijinul din partea societății (știința cere cheltuieli tot mai mari), iar pentru „interpreți“, în primul rînd sentimentul de satisfacție pe care li-l oferă munca lor. Din această cauză, în fața majorității persoanelor care doresc să se îndeletnicească sau se îndeletnicească de pe acum cu activitatea științifică (termenul „om

¹ *The Pulsar's Pindar*

Rhythmically pulsating radio source,
Can you not tell us what terrible force
Renders your density all so immense
To account for your signal so sharp and intense ?

de știință“ s-a banalizat pînă într-atît încît îmi vine greu să-l utilizez), se pune întrebarea: cum este mai bine să-și folosească forțele? Cu ce să se ocupe pentru ca munca lor să fie mai eficientă? După cum mi se pare, tocmai prin aceasta — în afară de sentimentul firesc al curiozității și de unii factori de altă natură — se explică faptul că oamenii de știință discută atît de frecvent despre succesele din domeniile învecinate și reacționează atît de viu la realizările și descoperirile noi.

În lumina celor spuse este firească concluzia că interesul deosebit de mare de care se bucură astronomia, simțitor accentuat după al doilea război mondial, se explică prin abundența descoperirilor care se țin lanț. Sub acest raport astronomia (inclusiv cercetările cosmice) a lăsat evident în urmă fizica. Pe de altă parte explicația succesorilor în acest domeniu este aproape în întregime legată de fizică și de tehnică: de apariția unei radioaparaturii extrem de sensibile și de posibilitatea de a trimite aparate dincolo de limitele atmosferei cu ajutorul rachetelor și al sateliților.

Pe această bază, numai în primii 8 ani ai deceniului al șaptelea (1960—1967) au fost descoperite radiosursele cvasistelare—quasarii —, puternice surse cosmice de radiație Roentgen și radiație termică cosmică cu o temperatură de $2,7^{\circ}\text{K}$ (este aproape în afară de îndoială că această radiație a fost generată cu aproximativ 10 miliarde de ani în urmă, cu mult înainte de apariția galaxiilor și a stelelor). Nu mai menționăm numeroase realizări de o importanță mai modestă, printre care construirea de telescoape Roentgen capabile să realizeze o imagine Roentgen a Soarelui cu o putere de rezoluție la pînă 2 secunde. În ceea ce privește anul 1968, el va rămîne, probabil, în istoria astronomiei ca „anul pulsarilor“.

Vestea descoperirii pulsarilor — surse de radiație radio pulsatorie — a apărut în articolul radioastronomilor englezi Hewish, Bell, Pilkington, Scott și Collins, în revista engleză „Nature“ din 24 februarie 1968. Repezițiunea cu care studiile științifice realizate în zilele noastre devin un patrimoniu al publicului larg (ce-i drept, numai în cazurile cele mai bune) este faptul că articolul a fost primit de redacția revistei la 6 februarie. A fost deci nevoie de numai 15 zile pentru a publica un studiu științific destul de amănunțit cu 4 figuri. Bineînțeles, nu acesta este aspectul cel mai impresionant al publicării studiului astronomilor englezi, chiar dacă nu ne referim pentru

moment la conținutul lui. Elementul neobișnuit constă în faptul că descoperirea a fost ținută cîteva luni de zile în secret.

S-au făcut observații, s-au prelucrat materiale, dar despre aceasta a știut numai personalul laboratorului angajat în lucrare, în timp ce chiar „vecinii“ cei mai apropiați — cercetătorii din domeniul astronomiei și astrofizicii care lucrau în aceeași localitate, în vechiul oraș universitar Cambridge — nu aveau nici o idee despre descoperirea pulsarilor. Printre victimele „secretului“ mă număr și eu: mă aflam la Cambridge tocmai în această perioadă (de la începutul lunii noiembrie 1967 pînă la începutul lui ianuarie 1968). Trebuie să mărturisesc că la început acest mister cu care s-au înconjurat oameni cărora eu le-am împărtășit rezultatele lucrărilor mele și cu care am discutat numeroase probleme științifice, mi s-a părut supărător și ciudat. Dar în curînd aceste sentimente s-au șters fără urmă. Păstrarea în secret a descoperirii ar fi fost într-adevăr jignitoare dacă ar fi vizat numai anumite persoane, de pildă pe mine, oaspete din altă țară. Or, rezultatele cercetărilor nu au fost comunicate nici unei persoane din afara laboratorului în cauză și, ceea ce este lucrul principal, sînt convinși că ținîndu-și în taină cercetările autorii erau animați de cele mai bune intenții. Ei doreau să-și desfășoare observațiile în liniște și cît mai temeinic, să publice rezultate certe, să nu se pripească a anunța o veste senzațională (de altfel la început a existat și presupunerea că e vorba despre recepționarea unor semnale de la o civilizație extraterestră). Menționăm că autorii și-au asumat un anumit risc: se putea întîmpla ca pulsarii să fie descoperiți de alți oameni de știință și descoperirea acestora să fie publicată mai înainte. A fost nevoie de o mare stăpînire de sine — trăsătură, după părerea mea, caracteristică întregului stil de lucru care domnește în reputatul centru al științei engleze — pentru a nu da publicității timp de cîteva luni descoperirea pulsarilor. De altfel, desfășurarea ulterioară a evenimentelor a arătat cîtă dreptate au avut Hewish și colegii lui (inclusiv conducătorul observatorului radioastronomic de la Cambridge, M. Ryle), temîndu-se ca nu cumva publicarea știrii despre existența pulsarilor să schimbe întregul caracter al activității lor.

Într-adevăr, începînd din data de 9 martie 1968 — la două săptămîni după publicarea articolului lui Hewish și al celorlalți — în revista „Nature“ a început să apară în flux articole despre

pulsari: rezultate ale unor observații, ipoteze teoretice și considerații critice. În mai 1968, în S.U.A. s-a și ținut o conferință despre pulsari, care a durat două zile. Rezultatele ei au fost expuse într-un mare articol în numărul din august al revistei americane „Physics Today”. În octombrie 1968, în revista „Nature”, care s-a transformat într-un fel de forum internațional al cercetării pulsarilor, s-au anunțat noi descoperiri privind natura pulsarilor. În ianuarie 1969 a reieșit că un pulsar descoperit cu cîtva timp mai înainte și care se află în nebuloasa Crabului este totodată și sursă de radiație în spectrul optic (acesta a fost primul pulsar optic descoperit).

Unii cititori nerăbdători se consideră poate frustrați la citirea primelor pagini ale articolului de față. Ei sînt dornici de cunoștințe despre pulsari și nu de relatări despre descoperirea pulsarilor. Pentru a nu mai pune la încercare răbdarea lor, voi trece la obiect.

Din punctul de vedere al observatorilor, pulsarii reprezintă un tip nou de radiosurse cosmice. Radiosursele cunoscute înainte de descoperirea pulsarilor ori sînt foarte constante în ceea ce privește intensitatea lor, ori dau loc la izbucniri și creșteri sporadice ale intensității. Printre aceste surse variabile se numără în primul rînd Soarele. Se observă de asemenea izbucniri ale radiației radio în cazul unor stele în explozie apropiate de noi. În perioade de ordinul cîtorva luni poate varia sensibil fluxul de radiație radio care ne vine de la quasari. În ceea ce privește fluxul care ne vine de la radiosursele cosmice tipice, cum ar fi cunoscutele anvelope ale supranovelor, el nu se modifică într-un an cu mai mult decît 1%. Fluxul de radiație radio al galaxiilor și radiogalaxiilor practic nu se modifică într-o măsură observabilă.

Trebuie să facem aici precizarea că avem în vedere modificări „autentice” ale fluxului de radiație radio, respectiv modificări legate de sursa însăși. În practică, recepționînd radiația radio cosmică la suprafața Pămîntului, înregistrăm nu numai modificările „autentice” (în sensul arătat) ale fluxului, ci și oscilațiile care apar în timpul propagării undelor radio de la radiosursă la receptor. Asemenea oscilații sau, cum se spune de obicei, scintilații se observă într-adevăr și sînt în linii mari analoge licăririi stelelor, care se explică prin trecerea luminii prin atmosfera terestră. În cazul undelor radio, scintilația este determinată de trecerea prin ionosfera Pămîntului (stra-

turile ionizate ale atmosferei situate la aproximativ 100 km deasupra Pămîntului) și prin norii de plasmă ejectați de Soare și care formează în spațiul interplanetar așa-numitul vînt solar. Este posibilă de asemenea producerea unor scintilații de origine interstelară, respectiv generate de neomogenitățile gazului ionizat interstelar. În ceea ce privește scintilațiile ionosferice și interplanetare, ele sînt destul de bine studiate și se disting de altele (este suficient să spunem, de pildă, că pentru scintilațiile interplanetare e caracteristic un timp de ordinul secundelor; afară de aceasta ele se reduc considerabil dacă sursele sînt observate noaptea).

Așadar, abstracție făcînd de scintilația surselor, putem spune că în cazul tuturor radiosurselor cosmice cunoscute mai înainte — în afară de Soare și stelele care erup — fluxul de radiație este în mare măsură constant. Nu mai vorbim de faptul că niciodată înainte de descoperirea pulsarilor nu s-au observat semnale cosmice care să se repete cu o periodicitate riguroasă.

În iulie 1967, la observatorul radioastronomic de la Mullard, în apropiere de Cambridge, a început să funcționeze un nou radiotelescop, construit de personalul observatorului și de studenți, și poate din această cauză de un aspect nu prea atrăgător. Dimensiunile telescopului sînt însă mari (lungimea 470 m, aproximativ 2 000 dipoli de recepție), iar aparatele cu care este înzestrat sînt deosebit de sensibile. Afară de aceasta — amănunt deosebit de important în cazul de față — telescopul funcționează pe lungimi de undă relativ mari (3,7 m, ceea ce corespunde frecvenței de 81.5 MHz), în timp ce în majoritatea cazurilor radiotelescoapele înregistrează radiații din domeniul undelor mai scurte: centimetrice și decimetrice. Alegerea undelor lungi și a caracterului aparatelor de recepție era legată de destinația noului radiotelescop. El a fost construit în primul rînd pentru cercetarea scintilațiilor interplanetare ale radiosurselor cosmice, în special ale quasariilor.

Încă în august 1967, pe banda dispozitivului de înregistrare s-a observat pentru prima dată un fenomen neobișnuit: scintilații repezi ale unei surse slabe, care se observau în toată noaptea, cînd asemenea scintilații sînt de regulă foarte slabe. Afară de aceasta, semnalul era recepționat numai un timp scurt. Ipoteza cea mai plauzibilă era, desigur, că ceea ce se recepționa nu reprezenta un semnal cosmic, ci un parazit terestru, de pildă o închidere a circuitului în instalația electrică a unui automo-

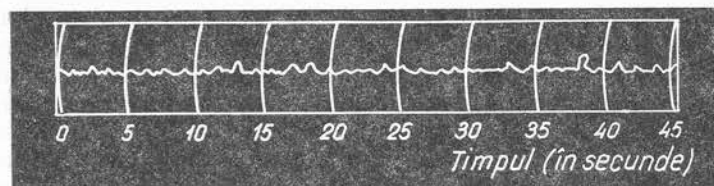


Fig. 21. Una din primele înregistrări ale semnalelor provenite de la pulsarul CP 1919 (recepționată pe lungimea de undă 3,7 m).

bil care trece prin apropiere. Radioastronomii știu că în 99% din cazuri noile „radiosurse variabile” ce se observă se dovedesc a fi simpli paraziți de acest gen. Dar la sfârșitul lunii septembrie ciudatul semnal fusese deja observat de 6 ori și oamenii de știință au început să-l studieze în mod special. S-a ajuns la concluzia că este un semnal de origine cosmică, provenit dintr-un punct bine determinat al sferei cerești și că el se repetă cu o regularitate uimitoare. În felul acesta a fost descoperit primul pulsar¹, CP 1919. Una din primele înregistrări ale semnalului provenit de la acest pulsar este reprodusă² în figura 21. După cum au arătat cercetările ulterioare, perioada pulsărilor (timpul scurs între două impulsuri) este de o constantă remarcabilă: nu s-a constatat nici măcar o variație egală cu o fracțiune de secundă pe an. Astfel, perioada T a pulsarului CP 1919 este egală cu 1,33730113 s, numărul cifrelor fiind limitat aici numai de precizia realizată de observatori.

¹ Radioastronomii din Cambridge, și după ei majoritatea următorilor, au convenit asupra următoarei notații: prima literă indică locul unde a fost descoperită sursa. C indică Cambridge, P arată că este vorba de un pulsar. În sfârșit, numărul 1919 corespunde uneia dintre coordonatele ecuatoriale ale sursei, respectiv ascensiunea dreaptă (α), care pentru pulsarul CP 1919 este egală cu 19 ore și 19 minute. Uneori se adaugă și coordonata a doua, declinația (δ). De pildă, pulsarul AP 2015 + 28 descoperit la Arecibo are $\alpha = 20^h 15^m$ și $\delta = 28^\circ$.

Radioastronomii din Australia nu urmează această notație. Ei desemnează pulsarii prin PSR (de pildă, sursa PSR 0833-45 este un pulsar cu $\alpha = 8^h 33^m$ și $\delta = -45^\circ$).

² Această figură, la fel ca și figurile 3 și 5, sint inserate în articolul publicat de A. Hewish în „Scientific American” din octombrie 1968.

Cu toate acestea, la sfârșitul anului 1968 s-a putut stabili că perioada pulsărilor crește cu o viteză foarte mică, fenomen la care vom mai reveni. Pentru moment, menționăm că, deși perioada este sensibil constantă, mărimea și forma unor impulsuri, după cum rezultă și din figura 17, nu sint constante și se schimbă apreciabil de la un impuls la altul. De pildă, pe unda de 3,7 m radiația pulsarului CP 1919 durează aproximativ 1 minut (adică în cursul unui minut impulsurile emise sint suficiente de intense), apoi, timp de 2—3 minute, sursa „tace” sau aproape tace. Forța semnalelor se schimbă și în funcție de frecvență și se modifică de la o lună la alta.

Cititorilor le provoacă, probabil, o oarecare nedumerire faptul că în aceste condiții se vorbește despre o determinare exactă a perioadei: este ușor de înțeles cum se face aceasta pentru semnale regulate și aproape identice în timp, dar cum se poate vorbi despre o perioadă exactă a unui semnal variabil? Răspunsul este simplu. Cunoscând exact perioada, putem prezice momentul apariției semnalului în viitor. Inconstanța semnalului în cazul unei perioade date se va manifesta în faptul că uneori semnalul nu va fi deloc recepționat, uneori el va atinge valoarea maximă într-un timp ceva mai mic, iar uneori într-un timp ceva mai mare decât cel calculat. Dar în medie poziția impulsului poate fi prevăzută pentru mai mulți ani și niciodată el nu va cădea în intervalul dintre pozițiile impulsurilor antecalulate.

Proprietățile observate la primul pulsar CP 1919 (în limitele a ceea ce este cunoscut astăzi) sint caracteristice pentru toți pulsarii descoperiți și studiați.

Așadar, pulsarii sint niște radiosurse cosmice care emit cu o periodicitate aproape riguros regulată semnale de o amplitudine și o formă inconstantă variind uneori considerabil de la un impuls la altul.

Curînd după descoperirea primului pulsar CP 1919, radioastronomii din Cambridge au detectat încă trei pulsari, și anume CP 0834, CP 0950 și CP 1133. Cu studierea pulsărilor a început să se ocupe și un alt radioobservator englez (Jodrell Bank lângă Manchester), precum și observatoarele din S.U.A., Australia și U.R.S.S. (în Uniunea Sovietică observațiile se efectuează la observatorul radioastronomie al Institutului de fizică al Academiei de științe a U.R.S.S. de lângă orașul Serpuhov). Pînă la prima aniversare a publicării informației despre desco-

perirea pulsarilor, respectiv pînă la 24 februarie 1969, au fost descoperiți 28 de pulsari. Nu ne îndoim că în momentul apariției acestei cărți numărul pulsarilor detectați va fi mai mare. Pulsarii cunoscuți pînă în prezent sînt enumerați în tabelul 1, unde în afară de denumirea pulsarilor este indicată și perioada (timpul ce se scurge între impulsurile succesive) cu o exactitate pînă la sutimi sau miimi de secundă.

*Pulsarii descoperiți pînă la sfîrșitul
lunii februarie 1969*

Pulsarul	Perioada în s	Pulsarul	Perioada în s
NP 0532	0,033	MP 1747	0,742
PSR 0833—45	0,089	MP 0835	0,764
PSR 1929+10	0,227	MP 1426	0,788
MP 1451	0,248	MP 1727	0,835
CP 0950	0,253	PP 0943	1,09
JP 1933+16	0,359	CP 1133	1,19
MP 0736	0,375	MP 0628	1,24
AP 0823+26	0,530	CP 0834	1,27
PSR 2218+47	0,538	CP 0808	1,29
AP 2015+28	0,558	CP 1919	1,33
PSR 1748—28	0,562	MP 0959	1,44
MP 0940	0,662	PSR 0904 77	1,58
CP 0328	0,715	PSR 2045—16	1,96
HP 1507	0,739	NP 0527	3,74

Pînă în octombrie 1969 pulsarul cu perioada cea mai scurtă a fost CP 0950 ($T = 0,25$ s); ulterior însă au fost descoperiți doi pulsari cu o perioadă mai mică, amîndoi situați în anvelopele unor supranove. Este vorba de pulsarul PSR 0833—45, situat în anvelopa vechii supranove Vela X, și de pulsarul NP 0532, situat în vestita nebuloasă a Crabului (supranova din anul 1054)¹.

¹ Din observații se cunoaște numai poziția acestor pulsari pe sfera cerească, care coincide cu poziția anvelopelor supranovelor respective. De aceea, logic vorbind, este posibil ca pulsarii să nu se afle chiar în anvelope, ci dincolo de ele sau între ele și Pămînt. Dar o asemenea posibilitate este foarte redusă, în special pentru nebuloasa Crabului, și de aceea nu o luăm în considerare. După descoperirea radiației optice a pulsarului NP 0532, presupunerea că el s-ar putea să nu se afle în nebuloasa Crabului, practic a căzut definitiv.

Radiația radio a pulsarilor, mai exact a unora dintre aceștia, a putut fi recepționată în spectrul undelor radio cu o lungime de 10 cm pînă la 10 m. Cu cît este mai mică lungimea de undă, cu atît este mai mic fluxul de radiație care revine la un interval dat de frecvențe (de pildă în zona de frecvențe cu o lățime de 1 MHz). Cu alte cuvinte, pulsarii emit mai ales în lungimi de undă metrice.

Un amănunt deosebit de interesant și important constă în aceea că pe diferite lungimi de undă un anumit impuls al radiației unui pulsar nu sosește simultan. Concret, la început impulsul este înregistrat de un aparat de radiorecepție acordat pe frecvențe înalte (pe lungimi de unde scurte) și numai după aceea vin impulsuri cu frecvențe tot mai joase.

Pentru a nu complica expunerea, să explicăm de la bun început despre ce este vorba. Să presupunem că o sursă oarecare dintr-o stea emite un scurt impuls radio care conține cele mai diverse frecvențe (aceasta înseamnă, bunăoară, că radiația pe toate frecvențele durează un timp oarecare t_0 — vezi fig. 22). Dacă impulsul s-ar propaga de la stea pînă la Pămînt în vid, am recepționa un semnal exact de forma semnalului emis. În realitate însă spațiul interstelar nu este vid, ci plin de un gaz foarte rarefiat. Acest gaz este parțial ionizat de radiația stelelor și deci în el există un număr oarecare de electroni (vom nota cu n_e concentrația lor, respectiv numărul lor la o unitate de

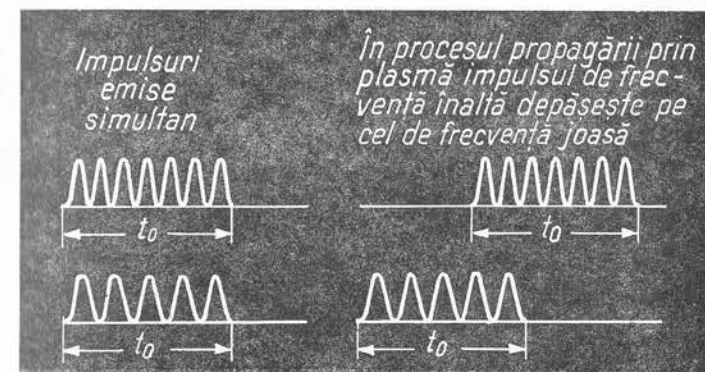


Fig. 22. Impulsurile (semnalele radio) de diverse frecvențe se propagă în plasmă (gazul ionizat) cu viteze diferite.

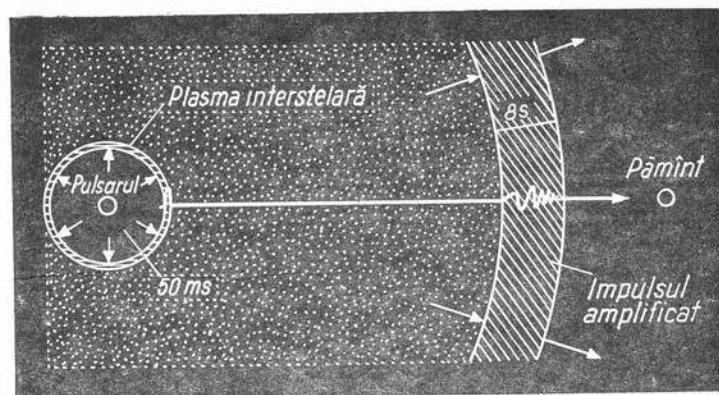


Fig. 23. Impulsul scurt emis de un pulsar (pentru exemplificare lungimea lui a fost fixată la 50 m/s) se propagă difuzându-se prin plasma interstelară și în partea lui anterioară conține oscilații de frecvență mai mare.

volum). Propagându-se prin gazul ionizat (plasmă), undele radio au o viteză diferită de viteza luminii în vid $c = 3 \cdot 10^{10}$ cm/s, și anume diferă inegal pentru lungimi de undă diferite. Pentru undele de înaltă frecvență (ultrasculte) viteza semnalului este apropiată de c , iar pentru undele de joasă frecvență ea este considerabil inferioară lui c (fig. 22). Toemai ca urmare a acestui efect se produce o întârziere a impulsurilor de frecvențe mici provenite de la pulsari față de impulsurile de frecvențe înalte (acest fenomen este reprezentat schematic în fig. 23). Cunoscând timpul de întârziere și folosind expresiile cunoscute pentru viteza mișcării impulsurilor se poate determina numărul total al electronilor întâlniți de fasciculul de unde în drumul dintre pulsar și Pământ. Dar acest număr total al electronilor N_e este egal cu concentrația lor medie n_e înmulțită cu distanța pînă la pulsar R , respectiv $N_e = n_e R$. Valoarea N_e se măsoară de obicei în $\text{ps} \cdot \text{cm}^{-3}$, unde ps este parsecul, cunoscuta unitate de lungime folosită în astronomie, egală cu aproximativ 3 ani-lumină sau $3 \cdot 10^{18}$ cm. Pentru pulsarii cunoscuți N_e are o valoare între 3 și câteva sute de $\text{ps} \cdot \text{cm}^{-3}$. Concentrația electronilor în spațiul interstelar nu este aceeași în diverse regiuni, dar în partea principală a sistemului nostru stelar, Galaxia, n_e este de obicei nu mai mic de $0,01 \text{ cm}^{-3}$. În unele

sectoare este posibilă o valoare medie $n_e \approx 0,1 \text{ cm}^{-3}$. Din aceste cifre se poate ușor deduce că pulsarii cunoscuți (sau în orice caz majoritatea lor) se află la sute sau mii de parseci de Soare și deci sînt situați în interiorul Galaxiei (distanța de la Soare pînă la centrul Galaxiei este egală cu 10 000 ps).

Cunoscând fluxul de radiație radio provenit de la pulsar și recepționat pe Pământ, precum și distanța pînă la pulsar, putem estima puterea radiației lui radio. Această putere este foarte mare; pentru unii pulsari ea este numai de 100 sau 1 000 de ori mai slabă decît puterea întregii radiații electromagnetice a Soarelui, care este egală cu aproximativ $4 \cdot 10^{33} \text{ erg/s} = 4 \cdot 10^{26} \text{ W}$. Dar Soarele emite în primul rînd lumină, iar radiația radio a Soarelui chiar și în perioada proceselor furtunoase care au loc în atmosfera lui este de mai multe miliarde de ori mai slabă decît radiația totală. Este adevărat că radioastronomia cunoaște și radiosurse mult mai puternice, dar în aceste cazuri nu e vorba de stele, ci de alte galaxii sau nebuloase, respectiv anvelope ale supranovelor. Cît despre pulsari, ei reprezintă niște stele sau niște obiecte extrasistemare. Aceasta rezultă din faptul că durata unui impuls al radiației radio a pulsarilor t_0 nu depășește de obicei 50 de microsecunde (0,05 s), iar în multe cazuri este și mai scurtă. Totodată, mărimea regiunii emițătoare de unde r nu depășește în general ct_0 , adică pentru pulsari este mai mică decît $3 \cdot 10^{10} \cdot 0,05 = 1,5 \cdot 10^9 \text{ cm} = 15 \text{ 000 km}$. Într-adevăr, să presupunem că se aprind simultan și se sting instantaneu un șir de becuri care ocupă un sector de o lungime r (fig. 24).

Atunci lumina de la becul cel mai depărtat va ajunge la observator la un interval de timp egal cu r/c după lumina pri-

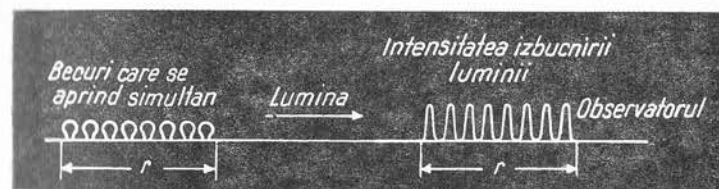


Fig. 24. Lumina care vine de la o serie de becuri ce se aprind simultan și sînt înșirate de-a lungul liniei sursă-observator se propagă în spațiu; pentru observatorul care recepționează lumina înregistrarea ei va dura un timp $t_0 = r/c$.

mului bec. Aceasta înseamnă că durata totală a înregistrării luminii de la becurile aprinse simultan în condițiile indicate în figura 24 va fi egală cu $t_0 = r/c$. Dacă lămpile nu se aprind simultan, ci într-o anumită ordine și dacă ele se mișcă toate cu repeziciune spre observator, se poate face ca durata de înregistrare a luminii să fie mai scurtă, adică mai mică decât $t_0 = r/c$. De aceea, concluzia că mărimea regiunii emițătoare de radiații este $r \leq ct_0$ a fost însoțită mai sus de cuvintele salvatoare în general, care fac ca această concluzie să nu fie strict obligatorie.

Așadar durata mică a impulsului este un argument care sugerează că dimensiunile pulsarilor sînt relativ mici, că se pot considera mai mici de 15 000 km. Pentru comparație să ne amintim că diametrul Soarelui este egal cu 1,4 milioane km, iar diametrul Pământului este de aproximativ 12 800 km. O mărturie nu mai puțin convingătoare a faptului că dimensiunile pulsarilor nu sînt mari constă în perioada scurtă a modificării intensității radiației pulsarilor. Am văzut că această perioadă T (perioada repetării impulsurilor) nu depășește 4 s. Oricare ar fi cauzele care determină perioada T — rotația sursei sau oscilațiile ei (vezi mai jos) — sursa unor impulsuri care se repetă cu o perioadă $T \leq 1$ s practic nu poate fi o regiune de mare întindere.

Toate aceste considerații i-au făcut pe radioastronomii englezi să formuleze încă în prima lor lucrare, menționată mai sus, ipoteza că pulsarii sînt niște stele foarte dense care pulsează (oscilează), niște pitice albe sau niște stele neutronice.

Radiația stelelor este întreținută de reacțiile nucleare care se desfășoară în interiorul lor. Dar cu timpul combustibilul nuclear se epuizează și steaua trebuie să moară. Or, stelelor „nu le place” să moară în liniște și pace. În loc de aceasta ele uneori explodează, pierzînd o parte a masei lor (aruncînd anvelopele), altele ele se dilată considerabil, transformîndu-se în „gigante roșii” etc. În ultimă instanță le așteaptă totuși una din următoarele trei posibilități (lăsăm la o parte varianta a patra, explozia, în urma căreia steaua se spulberă total).

Prima posibilitate: dacă masa stelei este mai mică decât 1,2 mase solare, steaua poate să se transforme într-o pitică albă, deci să devină foarte densă și de aceea și mică. Densitatea medie a piticelor albe și densitatea substanței din centrul lor se situează, după un calcul brut, între 10^6 și 10^{10} g/cm³. Cu alte cuvinte, 1 cm³ de substanță a unei pitice albe cîntărește

de la 1 pînă la 10 000 de tone! Pentru comparație amintim că densitatea medie a Pământului este de 5,5 g/cm³ și că în centrul Soarelui densitatea este aproximativ egală cu 100 g/cm³.

Faptul că substanța piticelor albe este atît de densă nu are nimic misterios. După cum am mai menționat, în interiorul stelelor obișnuite se desfășoară reacții nucleare și se degajă căldură. Ca urmare, în aceste stele se produce un decalaj de presiune de la centru la periferie, decalaj care compensează forțele de gravitație, împiedicîndu-le să comprime steaua. În momentul însă cînd reacțiile încetează, forțele de gravitație comprimă tot mai puternic steaua și într-o pitică albă li se opune doar presiunea gazului electronic (într-o stea densă toți atomii sînt striviți, așa încît substanța ei este alcătuită din nuclee atomice și electroni). După cum se constată, în acest caz steaua de echilibru corespunde unei stele cu o densitate centrală și medie foarte mare, adică unei pitice albe.

Aceste stele sînt denumite „pitice” din pricina micilor lor dimensiuni (au un diametru de 20 000 pînă la 8 000 km) și „albe” pentru că într-o serie de cazuri ele emit mai multe raze albastre și violete decât majoritatea stelelor, care par galbene sau roșii. Culoarea albă este, fără îndoială, rezultatul unei temperaturi mai mari la suprafața stelei. Aceasta nu contravine celor spuse mai sus cu privire la inexistența într-o pitică albă a unor rezerve mari de combustibil (unele rămășițe de combustibil se pot, totuși, păstra). Explicația constă în faptul că suprafața unei stele pitice cu un diametru, de pildă, de 14 000 km este de 10 000 ori mai mică decât suprafața Soarelui. De aceea este firesc ca avînd aceeași temperatură pitica să emită de 10 000 de ori mai puțină lumină decât Soarele. Dacă suprafața piticeii are o temperatură ceva mai mare (de pildă de 10 000°C, în timp ce temperatura de la suprafața Soarelui este de aproximativ 6 000°C), ea pierde relativ puțină energie și chiar fără completarea rezervelor de căldură răcirea ei va dura foarte mult. Unele stele pitice au apucat totuși să se răcească pînă în epoca noastră, dar în acest caz pur și simplu nu le vedem. Așadar se poate întîmpla ca piticele albe să nu fie deloc albe, însă exemplarele descoperite ale acestei clase de stele sînt pitice albe.

Să ne închipuim că masa unei pitice albe e mai mare. Se va întîmpla următorul fenomen: cînd masa va egala 1,2 din masa Soarelui, presiunea electronică nu va mai putea învinge forța

de gravitație, steaua va pierde stabilitatea și se va produce un colaps (o prăbușire). Dacă însă masa stelei este mai mică decât aproximativ două mase solare, intervine o altă stare de echilibru a stelei, și anume starea neutronică. În stelele neutronice substanța e alcătuită din neutroni, care se formează ca urmare a combinației protonilor cu electronii (în cazul unor densități gigantice o asemenea combinație este avantajoasă din punct de vedere energetic). Densitatea stelelor neutronice oscilează între 10^{12} și 10^{15} g/cm³. Este greu să ne închipuim o densitate atât de mare. Să ne amintim însă că densitatea substanței în nucleele atomice este egală cu aproximativ $2 \cdot 10^{14}$ g/cm³. Așadar o stea neutronică este comparabilă cu un uriaș nucleu atomic format în cea mai mare parte din neutroni (în stea există ca niște „impurități” și protoni, nuclee, electroni și alte particule).

Menționăm că masa stelelor neutronice poate fi și mai mică decât masa Soarelui. În acest caz pitica albă și steaua neutronică sînt două stări posibile diferite ale stelei. Care dintre ele se va realiza? Aceasta depinde de caracterul evoluției stelei. Dacă steaua explodează sub forma unei așa-zise supranove, s-a ajuns demult la concluzia că în centrul ei după consemnarea exploziei poate să rămînă o stea neutronică. Diametrul stelelor neutronice cu o masă aproximativ egală cu masa Soarelui este de aproximativ 15—20 km, iar diametrul celor mai „ușoare” stele neutronice ajunge probabil pînă la cîteva sute de kilometri.

Stelele cu o masă mai mare decât două mase solare nu pot rămîne în echilibru cînd ajung reci; în asemenea condiții nici chiar presiunea dintr-o stea neutronică nu se poate opune forțelor de gravitație care comprimă tot mai mult steaua. Cu alte cuvinte se produce un colaps și anume nelimitat, în sensul că nici o nouă stare de echilibru nu este cu putință. O asemenea stea dispare din cîmpul vizual, dar continuă să exercite o forță de atracție asupra altor stele. Nu ne putem opri aici mai amănunțit asupra acestui caz¹.

Piticele albe și stelele neutronice (ca și toate celelalte stele și planete) pot prezenta fenomenul de pulsație, de oscilație.

¹ În esență, steaua se contractă „indefinit” și, conform ipotezelor relativității generalizate, ea nu mai poate emite semnale luminoase, forța gravitației fiind atît de puternică încît le „întoarce înapoi”. În această situație, aceste obiecte cerești, a căror existență pare azi posibilă, sînt denumite „găuri negre” (N. T.).

Forma cea mai simplă a unor asemenea pulsații (pulsațiile radiale) constă în deplasarea substanței din stea numai de-a lungul razei. În acest caz întreaga suprafață a stelei se ridică și se lasă în jos în mod periodic. Perioada pulsațiilor radiale ale piticelor albe este mai mare decât aproximativ o secundă, iar perioada de pulsație a stelelor neutronice este de ordinul a 0,01 s sau mai mică. În cele de mai sus avem în vedere pulsația principală, „tonul” fundamental. Dar ea și o coardă, steaua poate să pulseze și în „tonuri secundare”, de fapt, superioare, cu o perioadă mai mică decât a „tonului” fundamental. Confruntînd cele spuse cu datele referitoare la perioada radiației pulsarilor, ajungem în mod cert la următoarea concluzie: dacă perioada pulsarilor T este perioada de pulsație a unei stele, o asemenea stea poate fi numai o pitică, deoarece pentru o stea neutronică sînt posibile numai perioadele mai mici decât aproximativ 0,01 s.

Au existat deci toate temeiurile pentru a identifica perioada T a pulsarilor cu perioada oscilațiilor piticelor albe, așa cum s-a considerat just încă de la început, după descoperirea pulsarilor. Suprafața stelei care pulsează trimite în atmosfera ei rarefiată, compusă din plasmă, puternice unde de compresiune, precum și fluxuri de particule. Sînt cunoscute mecanismele care „prelucrează” aceste unde și fluxuri, transformîndu-le în oscilații ale plasmei și radiație din domeniul radio. Este esențial faptul că radiația radio a pulsarilor este polarizată, cu alte cuvinte și cîmpul electric are o anumită direcție preferențială. Atît pentru explicarea polarizării radiației, cît și din alte considerente, modelul piticeii albe care pulsează trebuie completat cu ipoteza că această stea posedă un cîmp magnetic.

Existența momentului magnetic și deci a cîmpului magnetic în interiorul și în afara stelei (în atmosfera ei) este un fenomen obișnuit. Există chiar o clasă specială de stele, stele magnetice, cu un cîmp foarte puternic care se ridică la cîteva mii de oerstezi (cîmpul magnetic al Pămîntului, care posedă și el un moment magnetic, are în vecinătatea polilor o intensitate de 0,5 oerstezi). Un cîmp magnetic, fie chiar slab, posedă probabil majoritatea stelelor. Cînd steaua se comprimă transformîndu-se într-o pitică albă sau într-o stea neutronică, cîmpul se comprimă și el și de aceea intensitatea lui crește. Rezultă de aici că piticele albe și stelele neutronice (sau majoritatea lor) sînt și ele, după toate probabilitățile, stele magnetice.

Cu analiza modelelor care prezintă pulsarii drept niște pitice albe magnetice s-au ocupat V.V. Jelezneakov, V.V. Zaițev și autorul prezentului articol. Pînă în octombrie 1968 ni s-a părut că un asemenea model este foarte verosimil și apt pentru a explica toate proprietățile cunoscute ale pulsarilor.

Cu toate acestea nu există nici o certitudine că modelele care asimilează pulsarii cu piticele albe magnetice sînt valabile. În primul rînd multe proprietăți ale pulsarilor au rămas (și rămîn) insuficient studiate. În al doilea rînd, o seamă de fizicieni și de astronomi nu sînt deloc de părere că modelele de pulsari asimilați cu stele care pulsează sînt atît de firești sau de plauzibile. Între altele, încă de multă vreme (la scara istoriei descoperirii pulsarilor, care începe în prima jumătate a anului 1968) s-a propus și a început să fie discutat destul de asiduu modelul de pulsar similar cu un far în rotație. Dacă un far obișnuit emite un fascicul destul de îngust de lumină într-o direcție oarecare și totodată se rotește, o corabie aflată în larg va vedea izbueniri de lumină. Pulsurile se repetă în funcție de perioada rotației dispozitivului său emițător de lumină, iar durata izbuenirii este determinată de lățimea fasciculului de lumină. În mod cu totul analog, dacă pe o stea care se rotește există o „pată fierbinte“, o sursă de radiație radio care emite un fascicul mai mult sau mai puțin îngust de radiunde, observatorul care ajunge în acest fascicul va recepționa impulsuri ale radiației radio care se vor repeta periodic (fig. 25). În felul acesta în modelele cu „far“ perioada T a pulsarului este egală cu perioada de rotație a stelei și de aceea este foarte firească marea constanță a perioadei. Pentru o stea neutronică în rotație sînt

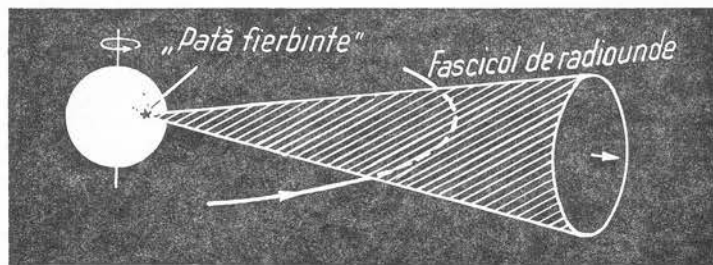


Fig. 25. Modelul cu „far“. În acest model pulsarul se prezintă ca o stea care se rotește și care emite un fascicul orientat de unde radio.

între totul acceptabile și valorile observate ale perioadei, care sînt mai mici decît 4 s. Pentru piticele albe însă perioadele scurte, mai mici decît o secundă, și în special de ordinul unor zecimi de secundă nu mai sînt admisibile, deoarece ele corespund unei viteze prea mari de rotație a suprafeței stelei. Cu alte cuvinte, o pitică albă care s-ar roti atît de repede s-ar spulbera (să ne închipuim Pămîntul, care s-ar roti în jurul axei sale nu în 24 de ore, ci într-o secundă). Așadar, în modelele cu far pulsarii sînt niște stele neutronice. Această ipoteză în sine nu stîrnește obiecții. Dar de ce emite steaua un flux extrem de puternic de unde radio și, pe deasupra, un fascicul riguros orientat? Imaginea rămînea cu totul neclară, ceea ce a îndemnat pe mulți (inclusiv pe autorul acestui articol) să conteste modelele cu „far“ și să acorde cu hotărîre preferință modelelor care prezintă pulsarii ca stele care pulsează.

Care dintre aceste modele este mai apropiat de realitate?

Tabloul s-a limpezit într-o anumită măsură după ce la 19 octombrie 1968 revista engleză „Nature“ a publicat articolele radioastronomilor americani Drake și Kraft. S-a ajuns la concluzia că pentru unii pulsari sînt valabile într-un anumit sens ambele modele: și modelul stelei care pulsează și modelul cu far. Mai exact, pentru unii pulsari pare să corespundă realității un model combinat, în care steaua pulsează și se rotește în același timp.

Descriind mai sus proprietățile pulsarilor, am trecut sub tăcere unele amănunte. Este vorba de forma și structura impulsurilor radiației în domeniul radio a pulsarilor. Aceste impulsuri au o structură complexă. Se părea că la unii pulsari fiecare impuls constă din 2—3 subimpulsuri. Lucrurile se complicau prin faptul că de la un impuls la altul se schimba poziția și chiar numărul subimpulsurilor. Drake și Kraft analizînd pulsarul AP 2015 + 28 (și, cu o certitudine mai mică, pulsarul CP 1919 și încă doi pulsari) au ajuns la concluzia că de fapt radiația radio a pulsarilor nu se caracterizează printr-o singură perioadă, ci prin două. Dacă prima perioadă T_1 (perioada principală) pentru pulsarul AP 2015 + 28 și C 1919 este egală, după cum am văzut, cu 0,558 s și respectiv 1,33 s, a doua perioadă (scurtă) pentru aceiași pulsari este respectiv $T_2 = 0,0106879$ s și $T_2 = 0,0155089$ s (aici sînt indicate toate cifrele cunoscute: precizia realizată în determinarea perioadei a doua

este de 0,0000001 s). Perioada întâi și a doua sînt deci incommensurabile. Practic, aceasta înseamnă că perioada mai mică nu este egală cu perioada mai mare înmulțită cu o fracțiune de tipul $1/3, 1/5, 2/9$ etc. Rezultă deci că în cadrul fiecărui impuls a cărui durată t_0 depășește perioada mai mică T_2 tabloul se schimbă neîncetat. Situația poate fi înțeleasă mai complet și mai intuitiv dacă recurgem la același exemplu al unui far în rotație a cărui perioadă de rotație este T_1 și a cărui lampă își schimbă periodic strălucirea cu o perioadă T_2 . În acest caz pe navă se vor observa scipiri periodice ale luminii la intervale egale cu T_1 și cu o durată anumită t_0 care va depinde de T_1 și de lățimea fascicului luminos emis de far. Dar în cursul intervalului de scipire a luminii t_0 , lumina își va mai schimba strălucirea și cu timpul (perioada) de modificare a strălucirii egal cu T_2 .

Ajungem deci la următorul model de pulsar. Pulsarii sînt niște stele neutronice care se rotesc cu perioada principală a pulsarilor T_1 . În același timp steaua pulsează cu perioada mai mică T_2 . Perioada T_2 pare să fie suficient de mică pentru a aparține într-adevăr stelei neutronice. Steaua emite, ca în toate modelele „cu far” descrise, numai un fascicul relativ îngust de unde radio. Poate fi vorba, de pildă, de tabloul care rezultă din figura 25. În acest caz rolul „petei fierbinți” emitente îl pot avea polii magnetici ai stelei, care nu se află pe axul de rotație. Să ne amintim că polul magnetic și cel geografic al Pămîntului nu coincid nici ei. O altă posibilitate ar fi ca steaua să nu emită un fascicul conic de unde radio (uneori un asemenea fascicul este denumit „fascicul în creion”), ci un fascicul în formă de lamă. Aceasta înseamnă că radiația este concentrată în vecinătatea unui plan care coincide, bunăoară, cu planul ecuatorului magnetic (acest plan trebuie să fie perpendicular pe axul magnetic care trece prin polii magnetici sud și nord ai stelei).

Trebuie să formulăm, totuși, o rezervă foarte importantă. În afară de pulsarii menționați CP 1919 și AP 2015 + 28, în cursul primului an al cercetării au mai fost observate cu certitudine două perioade numai la pulsarul CP 0808 (lucrare efectuată de radioastronomii sovietici V.V. Vitkevici și alții). În majoritatea celorlalte cazuri, se pare că pur și simplu nu s-au făcut cercetări, dar pentru pulsarii cu perioadele scurte

NP 0532, PSR 0833—45 și CP 0950 pentru care există unele date nu avem nici o indicație cu privire la existența celei de-a doua perioade. Din acest motiv, cît și din altele, s-a emis ipoteza că pot exista pulsari de tipuri diferite. Dacă dăm frîu liber imaginației, ne putem închipui pulsari în rotație, pulsari care posedă mișcări de rotație și de pulsație și în sfîrșit pulsari care cunosc numai pulsații. Afară de aceasta unii pulsari pot fi stele neutronice, iar alții — cei cu perioadele cele mai mari — pot fi pitice albe. Clarificarea situației reale în toate aceste cazuri este o problemă a viitorului. Dar în lumina celor arătate este necesar ca în afară de modelul stelei neutronice cu rotație și pulsație să ne opriim cel puțin asupra încă unui model, și anume al unei stele neutronice care se rotește fără pulsații, dar posedă, ca și în primul caz, un puternic cîmp magnetic.

În apropierea stelei, acest cîmp (adică magnetosfera stelei) este antrenat în rotația ei sau, cu alte cuvinte, se rotește împreună cu partea densă a stelei. Dar la o distanță relativ mică de ax această rotație solidară a magnetosferei trebuie să înceteze. Într-adevăr, magnetosfera nu se poate mișca în raport cu plasma înconjurătoare cu o viteză mai mare decît viteza c a luminii. Or, în cazul unei rotații cu o viteză unghiulară $\omega = 2\pi/T$, viteza punctelor aflate la distanța r de axul de rotație va fi $v = \omega r = (2\pi/T_1)r$; viteza v va fi egală cu c la o distanță $r_{crit} = c/\omega = cT_1/2\pi$. Pentru pulsarul NP 0532 perioada $T_1 = 0,033$ s și $r_{cr} = 1,6 \cdot 10^8$ cm, adică mai mică decît raza Pămîntului $r_p = 6,37 \cdot 10^8$ cm.

Amintim că pentru Pămînt $T_1 = 24$ h = $8,65 \cdot 10^4$ s, $\omega = 2\pi/T_1 = 7,25 \cdot 10^{-5}$ și $r_{cr} = 4 \cdot 10^{15}$ cm, în timp ce distanța de la Pămînt la Soare este egală cu $1,5 \cdot 10^{13}$ cm. De fapt, în cazul Pămîntului chiar la distanța de ordinul a 10 raze terestre cîmpul magnetic este atît de slab, încît nu poate antrena plasma circumterestră (intensitatea cîmpului este de ordinul a $10^{-3} \dots 10^{-4}$ oerstezi). Ca urmare, la distanțe mari magnetosfera terestră ca regiune a cîmpului magnetic terestru ordonat încetează să existe. Chiar și din acest exemplu se vede clar că raza critică r_{crit} poate fi real atinsă numai pentru o stea cu un cîmp puternic și în rotație rapidă, astfel încît la distanțele $r = r_{crit}$ cîmpul stelei să mai fie suficient de puternic.

Revenind la pulsarul NP 0532 și la alți pulsari cu perioada scurtă, vedem că pentru ei raza critică a magnetosferei r_{crit}

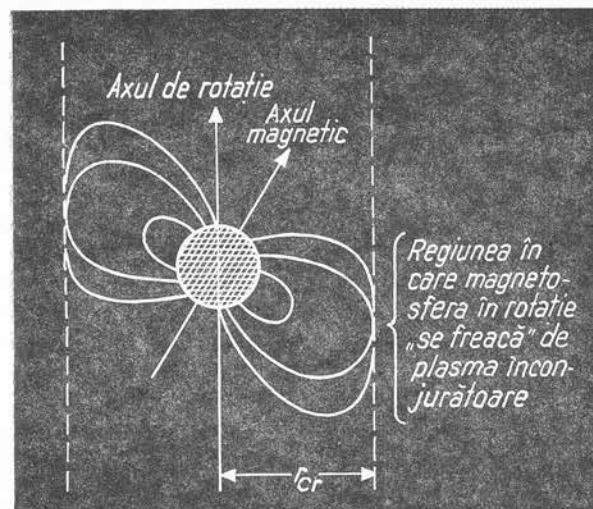


Fig. 26. Magnetosfera steii (cîmpul magnetic care înconjoară steaua și creat de ea) nu se poate roti cu o viteză mai mare decît viteza luminii. Din această cauză la o distanță $r_{crit.} = cT_1/2\pi$ sau chiar la o distanță ceva mai mică se formează un hotar între magnetosfera care se rotește odată cu steaua și plasma circumstelară.

este relativ mică, așa încît la distanțe mai mici cîmpul magnetic al steii mai poate fi suficient de puternic pentru a antrena plasma circumstelară, dar la distanța $r_{crit.}$ sau chiar la o distanță mai mică rotația „de corp solid” a magnetosferei trebuie să înceteze și pe o anumită suprafață magnetosfera în rotație se va „freca” de plasma circumstelară rarefiată din jurul ei (figura 26). În regiunea de tangentă apare o instabilitate a mișcării gazului, se vor naște unde de tipuri diferite etc. E de presupus că această regiune de tranziție va îndeplini astfel aceleași funcții pe care le-am rezervat mai sus pulsațiilor stelei. Totodată are o importanță esențială faptul că existența mișcării plumei în raport cu cîmpul magnetic în regiunea de tranziție duce la apariția în plasmă a unui cîmp electric care accelerează particulele.

Așadar pare posibil și chiar probabil ca pulsarii cu perioadele scurte să fie niște stele neutronice în rotație, cu un cîmp magnetic suficient de puternic. Este probabil că alți pulsari se rotesc și

în același timp pulsează. De asemenea nu este exclus să nu fie vorba de pulsațiile steii întregi, ei, bunăoară, numai de oscilațiile atmosferei sau magnetosferei ei.

În cadrul modelelor care prezintă pulsarii ca stele în rotație pare foarte firească mărirea perioadei principale pentru toți pulsarii cercetați, fenomen observat la sfîrșitul anului 1968 și la începutul anului 1969. Cu timpul rotația se încetinește și perioada T_1 crește (dimpotrivă pentru o asemenea schemă tocmai micșorarea perioadei ar fi un fenomen neașteptat). Perioada crește cu cea mai mare viteză la pulsarul cel mai tânăr, caracterizat prin cea mai scurtă perioadă dintre toți pulsarii existenți: pulsarul NP 0532 din nebuloasa Crabului. Perioada acestui pulsar crește cu $1,4 \cdot 10^{-5}$ s/an și se va dubla în 2400 de ani. La pulsarul PSR 0833—45 perioada crește cu $3,6 \cdot 10^{-6}$ s/an și trebuie să se dubleze în 24000 de ani. Și în cazul pulsarilor cu perioada mai mare s-a constatat creșterea perioadei, dar o creștere mai lentă: perioada se dublează în milioane și zeci de milioane de ani. De pildă, în cazul pulsarului CP 0834 perioada crește cu $1,5 \cdot 10^{-7}$ s/an și trebuie să se dubleze în $8,5 \cdot 10^6$ ani. Menționăm că pînă în prezent nu a fost creat un ceasornic care să posede o asemenea precizie de funcționare în condițiile de laborator.

Primul an de studiere a pulsarilor s-a încheiat prin identificarea pulsarului NP 0532 ca obiect în spectrul optic; aceasta s-a dovedit a fi o stea mică, destul de slabă, descoperită mai demult în nebuloasa Crabului. Această stea era considerată din anul 1942 drept cel mai probabil candidat pentru rolul de rămașită a supranovei din anul 1054, a cărei explozie a generat nebuloasa Crabului. Dar această opinie avea doar un caracter ipotetic. În primul rînd se putea întîmpla ca pe fotografia nebuloasei să apară doar o imagine proiectată a stelei, aceasta aflîndu-se în realitate, de pildă, între nebuloasă și Pămînt. În al doilea rînd, chiar dacă steaua se află în interiorul nebuloasei, aceasta încă nu demonstrează că ea a rămas de la explozie. Diametrul nebuloasei Crabului care se află la o distanță de 2000 parseci sau 6000 de ani-lumină, sau $6 \cdot 10^{21}$ cm de Pămînt este astăzi 3 ps = $9 \cdot 10^{18}$ cm și într-un spațiu atît de vast se poate întîmpla ca steaua să fi ajuns cu totul întîmplător. Ce-i drept, steaua se află în apropierea centrului nebuloasei și posedă un spectru neobișnuit. Tocmai din această cauză s-a presupus

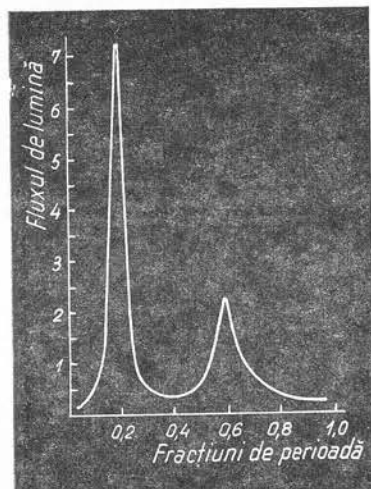


Fig. 27. Variația strălucirii optice în perioada $T_1=0,033$ a micii stele din nebuloasa Crabului, identificată cu pulsarul NP 0532.

că ea este o rămășiță a exploziei. Repetăm însă că această aserțiune nu era considerată ca demonstrată. Astăzi posedăm demonstrația care ne lipsea, deoarece această stea mică s-a dovedit a fi un pulsar optic. Lumina emisă de ea își schimbă intensitatea cu o perioadă de 0,033 s, care coincide cu perioada radio-pulsarului NP 0532. Aceasta demonstrează totodată că e vorba de același obiect. Dependența fluxului luminos de timp pentru acest pulsar este reprezentată în figura 27. În cursul perioadei sale pulsarul dă loc la două izbucniri luminoase (un fenomen asemănător se observă în spectrul radio). Între două izbucniri radiația optică a pulsarului este foarte slabă: nu mai mare de câteva procente din valoarea maximă a radiației (în această privință figura 7 nu este suficient de concludentă, deoarece în intervalul dintre impulsuri o parte din radiație este legată de fondul cerului și nu de pulsarul însuși). Poate că nu este inutil să precizăm că în trecut steaua din nebuloasa Crabului era observată numai prin metoda fotografică, sau în orice caz fără procedee speciale, ingenioase, care să permită observarea modificărilor rapide ale strălucirii. Tocmai de aceea nu s-a ivit bănuiala că e vorba de un pulsar optic: s-a observat doar intensitatea medie în timp. În această ordine de idei putem presupune că există și alți pulsari optici care încă nu au fost căutați;

observarea stelelor prin metodele obișnuite nu poate duce în nici un caz la detectarea unor pulsari cu perioade scurte. Nu este exclus ca observarea stelelor cu ajutorul metodelor noi care permit înregistrarea unor oscilații foarte rapide ale intensității (fracțiuni de secundă, de milisecundă etc.) să inaugureze un capitol nou în astronomia optică.

Care este natura radiației radio și a radiației optice a pulsarelor?

Un răspuns întru totul cert la această întrebare încă nu a fost găsit. Pentru domeniul de unde radio, radiația pulsarelor este atât de puternică încât nu poate fi vorba de radiația totală a unor particule independente (o radiație a cărei intensitate este egală cu suma intensităților radiațiilor mai multor particule se numește incoerentă). Așadar, radiația radio a pulsarelor este o radiație coerentă a unor particule, rolul esențial avându-l în acest fenomen existența plasmă (autorul este conștient de insuficiența claritate și precizie a acestei explicații, dar o lămurire mai detaliată a problemei mecanismelor radiației ar trebui să facă obiectul unui articol aparte și, în afară de aceasta, cere cunoștințe speciale). În ceea ce privește radiația optică a pulsarului NP 0532 poate că avem de-a face în acest caz cu o radiație incoerentă, sincrotronă (de frinare magnetică) a electronilor relativști aflați în magnetosfera stelei (despre mecanismul acestei radiații s-a vorbit în capitolul precedent).

Descoperirea pulsarelor radio și optici oferă posibilitatea de a studia plasma interstelară și câmpurile magnetice interstelare, cât și de a folosi un orologiu cosmic foarte precis pentru diverse scopuri.

Lucrul de căpetenie este însă că s-au descoperit obiecte de un tip nemaiobservat în trecut, care reprezintă după toate probabilitățile niște stele neutronice.

Dacă această din urmă concluzie este corectă, s-a făcut o descoperire deosebit de importantă, de care astronomia s-a apropiat treptat în decurs de peste trei decenii. Într-adevăr, curînd după descoperirea neutronului în 1932, s-au și emis ipoteze cu privire la existența unor stele cu miezul format din neutroni, respectiv stele neutronice. Suprafața acestor stele este atât de mică încât dacă ele ar emite radiații în același mod ca și stelele obișnuite, practic nu ar exista șanse de a le observa

chiar și cu ajutorul celor mai bune telescoape. Acum câțiv ani a apărut speranța că stelele neutronice vor putea fi detectate în perioada când sînt încă suficient de calde, și anume în spectrul radiației Roentgen. S-au formulat de asemenea ipoteze cu privire la rolul posibil al pulsațiilor stelelor neutronice. Cu toate acestea, după cum am văzut, descoperirea pulsarilor a fost ceva neașteptat; or, se pare că tocmai ea a dus în sfîrșit la descoperirea stelelor neutronice. Mai mult decît atît, a fost confirmată și ipoteza că stelele neutronice se mențin în anvelopele supranovelor și pot servi ca sursă a activității lor continue (această activitate este încă demult cunoscută pentru nebuloasa Crabului). Dacă descoperirea pulsarilor reprezintă cel mai mare eveniment astronomic din anul 1968, concluzia că astfel au fost descoperite stelele neutronice poate fi considerată una dintre cele mai importante realizări științifice ale ultimului deceniu.

Articolul de față a început cu cîteva considerații cu caracter general. Aș dori să-l termin în același spirit, trăgînd din descoperirea pulsarilor unele învățăminte cu privire la caracterul dezvoltării științei în epoca noastră.

Fizica și astronomia contemporană nu pot fi concepute fără acceleratoare și telescoape uriașe, adică fără o aparatură complexă și foarte costisitoare și nici fără numeroși specialiști cu diverse calificări care mînuiesc toate aceste aparate. Termeni ca „investiții“, „scheme de personal“, „devizuri“, „alocații pentru utilaje“ și o întreagă terminologie de acest tip se aud tot mai des în institutele științifice și în observatoare. Apar tot mai multe colective care lucrează cu instrumente unice în felul lor în lume. În presă se publică studii de un gen fără precedent, semnate de cîte zece sau chiar mai mulți autori. Toate acestea sînt caracteristice epocii și oamenii de știință trebuie să înțeleagă noile forme de activitate, să li se adapteze, renunțînd la părerile de rău după „bunele vremuri de altă dată“, cînd descoperirile remarcabile erau făcute de o singură personalitate, care nu avea la dispoziție decît un echipament extrem de modest după criteriile de astăzi: mici cabinete fizice și mici laboratoare. Este însă incontestabil că inexorabila industrializare a științei are și laturi negative. Pentru un tînăr experimentator este din ce în ce mai greu să-și afirme personalitatea,

să nu apară ca un șurub oarecare al unui mare mecanism. Poate că tocmai astfel se explică aspirația atît de puternică astăzi în rîndurile tineretului spre preocupări teoretice, domeniu în care este mai ușor să te afirmi. Tot mai adesea se întîmplă să auzim exclamații amare: cum să ne apucăm de rezolvarea cutărei probleme? Pentru asta e nevoie de milioane de ruble, de „scheme de personal“, de decizii speciale etc.

Adesea aceste plîngeri sînt justificate. Adesea — dar nu totdeauna. Tocmai această concluzie se poate trage din descoperirea pulsarilor.

În lume s-au construit astăzi numeroase radiotelescoape, dintre care unele costă mult mai mult decît instrumentul care a servit la descoperirea pulsarilor. Dar pînă și radiotelescopul cu ajutorul căruia au fost descoperiți primii pulsari a fost construit cu forțele proprii ale cercetătorilor, cu ajutorul studenților care au lucrat în observator în timpul vacanței. Cu toate acestea, telescopul posedă caracteristici unice, iar succesul astronomilor englezi nu poate fi în nici un caz considerat întîmplător. Aceeași observație este valabilă pentru întreaga activitate a observatorului radioastronomic Mullard, condus de M. Ryle. În acest observator funcționează un radiotelescop și mai remarcabil, cu diapazon decimetric, care a costat relativ ieftin și dă rezultate fără precedent.

Putem deci aprecia — și tocmai această concluzie am vrut s-o subliniez încă o dată pentru a încuraja tineretul — că, din fericire pentru știință și pentru noi toți, progresul științific este determinat ca și în trecut nu numai de fonduri și de noi „scheme de personal“. Profunzimea ideilor, înțelegerea clară a obiectivelor cercetării, un înalt nivel de calificare și de cunoștințe imbinat cu un entuziasm autentic, cu conștiințiozitate și cu devotament pentru cauză, rămîn și vor rămîne totdeauna cheazăia cea mai importantă a succesului în știință.

Anexa I (iunie 1969)

După cum s-a mai arătat, textul de bază al articolului reflectă situația problemei pulsarilor la un an după apariția informației despre descoperirea lor. În această perioadă au apărut vreo 200 de studii închinat pulsarilor. De atunci au fost

însă obținute multe rezultate noi pe care am dori să le punem în evidență. Consider că pentru aceasta nu este nevoie să modific textul articolului, ci doar să fac o completare.

La începutul lunii iunie 1969 cunoșteam 37 de pulsari, cu 9 mai mulți decât apar în tabelul nr. 1. Dar perioadele pulsarilor mai recent descoperiți nu depășesc limitele ce rezultă din acest tabel (dintre pulsarii noi perioada cea mai scurtă, egală cu 0,180 s, o are sursa MP 1449). Din această cauză, și ținând seama de caracterul investigațiilor care au dus la descoperirea noilor pulsari, putem spune următoarele: se naște impresia că pulsarii cei mai tineri posedă o perioadă scurtă egală cu aproximativ 10—20 miimi de secundă (pentru pulsarul NP 0532, care are 915 ani, perioada este egală astăzi cu 33 miimi de secundă). Cu timpul perioada crește, iar intensitatea radiației în domeniul radio scade, din care cauză pulsarii cu o perioadă $T \geq 4$ s nu mai pot fi observați cu ajutorul aparatelor existente sau, în orice caz, observarea lor devine foarte dificilă. Perioada medie de viață a pulsarilor observați prin metodele existente este de ordinul a 10^7 ani. Numărul total al pulsarilor din Galaxia noastră este de ordinul a $10^5 \dots 10^6$. Aceste date nu contravin ipotezei că pulsarii se formează la fiecare explozie sau la majoritatea exploziilor stelelor care duc la apariția unei supernove (în cazul unei asemenea explozii strălucirea stelei crește pentru un timp de câteva miliarde de ori; în Galaxie supernovele apar o dată la 30—60 de ani, dar majoritatea lor nu se văd din cauza absorbției luminii de către pulberea interstelară).

Date deosebit de interesante și de importante au fost obținute pentru pulsarii cu perioadele scurte din anvelopele supernovelor cunoscute: din Vela X și din nebuloasa Crabului.

Primul dintre acești pulsari, PSR 0833—45, a „sărbătorit” într-un mod foarte original aniversarea publicării informației despre descoperirea pulsarilor: între 19 februarie și 13 martie 1969 perioada acestui pulsar a scăzut brusc cu $1,96 \cdot 10^{-7}$ s (înainte și după datele menționate, care corespund pauzei dintre observații, perioada pulsarului PSR 0833—45 creștea cu $10,65 \cdot 10^{-9}$ s în 24 ore). Micșorarea perioadei de rotație a stelelor (considerăm că pulsarul este o stea neutronică în rotație și că perioada lui este egală cu perioada rotației) poate fi legată de comprimarea ei, respectiv de modificarea momentului de inerție, sau de diferența în viteza de rotație la diferite distanțe de centrul

stelei (o asemenea rotație nesolidară nu este totdeauna stabilă, ceea ce poate duce la modificarea vitezei unghiulare la suprafața stelei).

Afară de aceasta, radiația radio a pulsarului PSR 0833—45 observată pe lungimile de 21 și 17 cm s-a dovedit a fi foarte puternică sau chiar total polarizată (e vorba de faptul că în unele emise de pulsari câmpul electric este cît se poate de precis orientat; mai exact, direcția lui este fixată în fiecare moment, dar se modifică în cursul impulsului radiației). Studiul polarizării radiației radio (și optice) a pulsarilor poate să ne ofere cheia pentru construirea unor modele ale pulsarilor apropiate de realitate (avem în vedere atmosfera și magnetosfera pulsarului unde se creează radiația observată).

Pulsarul NP 0532 din nebuloasa Crabului s-a dovedit a fi nu numai sursă de unde radio și de radiație optică, ci și sursă de radiații Roentgen. Mai mult decât atât, luminozitatea totală (puterea radiației) acestui pulsar este în mod esențial determinată tocmai în domeniul Roentgen al spectrului. Astfel, în domeniul radiațiilor Roentgen cu o energie a fotonilor situată în intervalul dintre 1,5 și 10 keV (lungimea de undă situându-se între 8 și 1,2 angströmi) luminozitatea pulsarului este egală cu $6 \cdot 10^{35}$ erg/s. În spectrul optic (lungimea de undă situându-se între 3 400 și 8 300 angströmi), luminozitatea pulsarului este egală cu $6 \cdot 10^{33}$ erg/s, adică de 100 de ori mai mică. În spectrul radio pulsarul emite de sute de ori mai puțin. Totodată radiația pulsantă Roentgen care este emisă de pulsar reprezintă numai 9% din radiația Roentgen totală care ne vine de la nebuloasa Crabului (cu alte cuvinte în intervalul de energii ale fotonilor dintre 1,5 și 10 keV, 91% din puterea radiației revin componentei constante în timp, nelegată direct de pulsar; trebuie să avem în vedere că radiația pulsarului este considerată în calcule izotropă, ceea ce se apropie de realitate în cazul diagramei în formă de lamă a orientării radiației lui). Menționăm că puterea totală a radiației electromagnetice a nebuloasei Crabului în toate domeniile este egală cu $9 \cdot 10^{37}$ erg/s (dintre care în domeniul radiației Roentgen, în intervalul de energie dintre 1 și 500 keV, luminozitatea întregii nebuloase, inclusiv pulsarul, este egală cu 10^{37} erg/s).

Trebuie să menționăm de asemenea că perioada pulsarului și localizarea impulsurilor din domeniul Roentgen sînt aceleași

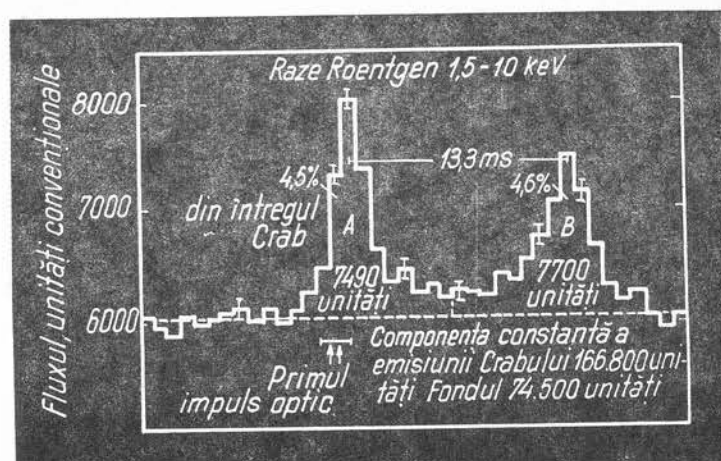


Fig. 28. Variația fluxului de raze Roentgen provenite de la pulsarul NP 0532 din nebuloasa Crabului.

ca și în domeniul optic (figura 27). Dar în domeniul Roentgen ambele impulsuri sînt în linii mari egale ca putere și amplitudine (figura 28), în timp ce în domeniul optic impulsul al doilea (numit uneori interimpuls) este sensibil mai slab decât primul impuls (figura 27).

Avem toate motivele să considerăm că pînă în anul 1054 al erei noastre în locul pulsarului NP 0532 se afla o stea destul de masivă care în anul 1054 și-a pierdut stabilitatea și a explodat. Produsele acestei explozii formează actuala nebuloasă a Crabului, care constă în special dintr-o anvelopă gazoasă care se extinde cu o viteză de ordinul a 1 000 km/s. În locul stelei care a explodat a rămas, după cum se pare, o stea neutronică cu o rază de ordinul a 10 km și cu o masă de ordinul masei Soarelui ($M_s = 2 \cdot 10^{44}$ g). Formarea stelei neutronice pare să fie legată de o foarte puternică contracție a stelei. În consecință, dacă steaua de la care s-a pornit nu s-a rotit decât foarte încet și a avut un câmp magnetic foarte mic (făcea bunăoară o rotație pe lună și avea un câmp de ordinul 1 oersted) steaua neutronică care se formează va avea o viteză unghiulară mare și un câmp puternic. Concret, pulsarul din nebuloasa Crabului făcea curînd după naș-

terea sa 50 de rotații pe secundă; câmpul lui magnetic nu se cunoaște, dar este foarte posibil să atingă miliarde de oerstezi.

O stea neutronică magnetică care se rotește cu repeziciune emite unde electromagnetice și, după cum am văzut, puterea acestei radiații (luminozitatea) în cazul pulsarului NP 0532 este astăzi de aproximativ $6 \cdot 10^{35}$ /s, aproape de 200 de ori mai mare decât luminozitatea totală a Soarelui. Este însă foarte probabil că pulsarul expulzează în nebuloasa Crabului plasmă fierbinte și în primul rînd particule încărcate rapide relativiste (radiație cosmică) cu o putere și mai mare, de ordinul a 10^{38} erg/s. Or, aceasta este luminozitatea nebuloasei Crabului în ansamblu și avem toate motivele să presupunem că sursa ei este tocmai pulsarul (în nebuloasă are loc „transformarea” energiei particulelor relativiste în radiație).

Astăzi este cunoscut un singur pulsar care emite în același timp radiații optice și Roentgen, pulsarul NP 0532. Este posibil ca radiația optică (și Roentgen) a pulsarilor să fie suficient de puternică numai în primele stadii ale evoluției lor și să fie întotdeauna însoțită de o radiație radio observabilă. Dacă este așa, pulsarii cu radiație optică și Roentgen trebuie să fie o raritate (în cazul radiației optice este esențial fenomenul absorbției interstelare a luminii, care împiedică observarea unui număr foarte mare de surse). Totuși nu este exclusă și o altă posibilitate: ar putea să existe pulsari cu radiație optică și Roentgen practic neobservabili în spectrul radio. Chiar parametrii pulsarului din nebuloasa Crabului nu contravin acestei ipoteze, deoarece radioluminozitatea lui este cu mai multe ordine de mărime inferioară luminozității optice și Roentgen (vezi mai sus). După toate probabilitățile undele radio provin din regiuni mai depărtate de suprafața stelei; în anumite condiții luminozitatea radio a acestor regiuni poate fi foarte mică.

Așadar, pulsari emițători de radiație optică și Roentgen trebuie căutați, cu siguranță, nu numai printre radiopulsari. O confirmare a acestui punct de vedere o reprezintă faptul că, după cum a reieșit ulterior, pulsarul NP 0532 fusese observat în domeniul Roentgen încă în 1927. Cercetătorii au determinat însă numai fluxul mediu al radiației Roentgen provenite din nebuloasa Crabului, dar abia după descoperirea pulsarului Roentgen în aprilie 1969 au prelucrat (cu succes) observațiile lor pentru a scoate în evidență componenta variabilă. Un alt argument în același sens poate fi analogia cu quasarii (QSR). Quasarii au

fost descoperiți ca radio-surse și apoi identificați cu obiecte optice evasistelare (QSO). Ulterior s-a dovedit însă că numai aproximativ 1% din toate obiectele optice evasistelare emit o radiație radio intensă. Majoritatea obiectelor optice evasistelare (denumite și galaxii evasistelare — QSO) se observă numai în domeniul optic. Să menționăm, în sfârșit, că și descoperirea radiopulsarilor a devenit posibilă datorită folosirii unei metodologii adecvate, a radiotelescopului care posedă o sensibilitate foarte mare pe unde metrice ¹, și, ceea ce nu este mai puțin important, adaptat pentru înregistrarea semnalelor cu variație rapidă. În cazul observațiilor optice metodologia cu ajutorul căreia au putut fi urmăriti pulsarii nu s-a folosit nici ea în trecut (ceea ce era și greu din motive tehnice care astăzi au dispărut în bună măsură).

Cele spuse dezvoltă observația făcută în textul de bază care avea drept scop să pună în evidență perspectiva căutării unor surse cu variație rapidă în spectrul optic și Roentgen, în special a unor surse pulsante.

Anexa II (martie 1970)

Până în prezent, în cei doi ani care au trecut după publicarea informației despre descoperirea primului pulsar s-au detectat aproximativ 50 de pulsari. De menționat că perioadele noilor pulsari se mențin în limitele în care se încadrează cele din tabelul dat de noi. Afară de aceasta, pulsarul NP 0532 rămâne unicul reprezentant al pulsarilor cu radiație optică și Roentgen. În general, ultimele luni nu au dus la noi constatări senzaționale. Au loc doar o acumulare a materialului și o precizare a informației. De aceea, în cele ce urmează ne vom opri asupra

¹ În radioastronomie este folosită adesea unitatea de flux (mai exact unitatea de densitate spectrală a fluxului de radiație) egală cu $10^{-26} \text{ W/m}^2 \cdot \text{Hz} = 10^{-23} \text{ erg/cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Hz}$. Pentru o serie de pulsari fluxul, în special pe undele decimetrice, este mai mic decât unitatea de flux. Următorul exemplu arată cât de mic este un asemenea flux: să presupunem că fluxul radiației nu depinde de frecvență în intervalul de frecvențe $\Delta\nu = 10^9 \text{ Hz}$ și este egal în acest interval cu unitatea de flux; în acest caz, pe întreg Pământul în intervalul indicat vine de la sursă o radiație cu o putere (sau cu un flux total) egală cu 10^{-3} W .

unei singure probleme: suprafluiditatea și supraconductibilitatea stelelor neutronice.

Suprafluiditatea și supraconductibilitatea sînt stări speciale ale substanței, care se observă în condițiile terestre numai la o temperatură foarte joasă. Așa, de pildă, la temperatura de $2,17^\circ\text{K}$ heliul lichid trece în starea suprafluidă, putîndu-se scurge prin canale sau orificii fără nici o frecare. Tocmai această posibilitate de scurgere fără rezistență (frecare) a justificat introducerea termenului de suprafluiditate. În mod analog se numește supraconductibilă acea stare a metalului în care curenții electrici poate trece prin el fără nici o rezistență. Astăzi se cunosc zeci și chiar sute de metale și aliaje supraconductibile. Cea mai mare temperatură la care s-a observat supraconductibilitatea (temperatură denumită critică) nu depășește pentru substanțele cunoscute 21°K . Supraconductibilitatea este analogă suprafluidității electronilor în metal. Nu este cazul să ne oprim aici asupra supraconductibilității și suprafluidității. Menționăm doar că aceste fenomene sînt legate de apariția unei anumite ordini în mișcarea sistemului de particule în interacțiune (atomii de heliu, electronii din metale).

Pot fi oare observate suprafluiditatea și supraconductibilitatea în cosmos și anume pentru niște substanțe „extraterestre”? Această problemă atrage în ultimii ani atenția oamenilor de știință¹. Un interes deosebit prezintă posibilitatea suprafluidității neutronilor, care reprezintă componenta principală a substanței în stelele neutronice, precum și a supraconductibilității protonilor, care există în stelele neutronice ca „impurități”, în cantități de ordinul unui procent sau a câtorva procente din numărul neutronilor. Întrucît această suprafluiditate și această supraconductibilitate din stelele neutronice sînt determinate de forțele nucleare, care sînt foarte mari, temperatura critică va fi în acest caz extraordinar de mare, de ordinul mai multor miliarde de grade.

În anexa precedentă s-a vorbit despre micșorarea în salt (în orice caz foarte bruscă) a perioadei pulsarului PSR 0833—45. După cum s-a constatat, după un asemenea salt încetinirea perioadei de rotație a pulsarului se desfășoară ceva mai rapid decât înainte de saltul perioadei. Recent cîțiva fizicieni ameri-

¹ Vezi articolul publicat de autorul prezentului volum în revista „Uspehi fiziceskih nauk”, vol. 97, p. 601, 1969.

cani au emis următoarea ipoteză care explică această comportare cu totul neobișnuită a pulsarului PSR 0833—45.

Stratul exterior al stelei neutronice este, după cum se presupune, solid, și atunci când rotația stelei se încetinește nu mai poate să-și schimbe forma decât în urma unei catastrofe, în urma unui „cutremur de stea” (la un moment dat modificarea formei stelei trebuie în mod necesar să se producă, deoarece când steaua se rotește mai încet, forma ei corespunzătoare stării de echilibru se apropie tot mai mult de o sferă, în timp ce în cazul unei rotații repezi steaua se prezintă ca un corp turtit, de pildă ca un elipsoid de revoluție). Steaua nu este însă în întregime solidă, și de aceea se pune problema cum se va modifica rotația straturilor lichide ale stelei aflate sub scoarța ei solidă.

Se poate demonstra că dacă aceste straturi lichide ale stelei constau din neutroni care nu sînt suprafluizi și din protoni care nu sînt supraconductibili (este mai indicat să vorbim respectiv de fluidul neutronic și fluidul protonic), practic imediat după „cutremur” întreaga stea va începe să se rotească cu aceeași viteză unghiulară. Ca urmare, încetinirea rotației stelei determinată de interacțiunea ei cu plasma circumstelară, de scurgerea plamei din stea etc. va continua după catastrofă cu aceeași viteză ca înaintea ei. Dacă însă straturile lichide ale stelei sînt suprafluide (în cazul părții neutronice a substanței) și supraconductibile (în cazul protonilor), trebuie să se observe consecințe de durată ale cutremurului: timp de cîțiva ani viteza de rotație a suprafeței stelei se va încetini mai repede decât înaintea acestui eveniment. După cum am văzut, tocmai acest fenomen poate fi observat: steaua (pulsarul PSR 0833—45) își încetinește rotația mai rapid după salt decât înainte de salt. De aici se și trage concluzia cu privire la suprafluiditatea și supraconductibilitatea straturilor lichide ale stelei neutronice.

La sfîrșitul lunii septembrie 1969 s-a observat un mic salt al perioadei și la pulsarul NP 0532 din nebuloasa Crabului. Afară de aceasta, pentru acest pulsar s-au descoperit oscilații line ale perioadei, care au loc cu un timp caracteristic (cu o perioadă) de aproximativ 3 luni. Ca și în cazul pulsarului PSR 0833—45, comportarea pulsarului NP 0532 se poate explica prin ipoteza suprafluidității și supraconductibilității unui strat apreciabil al stelei neutronice.

Trebuie să menționăm totuși că există și alte posibilități și că ar fi prematur să considerăm ca demonstrată existența suprafluidității și supraconductibilității în stelele neutronice.

Observațiile de mai sus sînt, desigur, insuficiente pentru a clarifica integral problema suprafluidității și supraconductibilității stelelor neutronice, precum și a interpretării salturilor și oscilațiilor perioadei care se observă la pulsari. Nici nu am urmărit acest obiectiv; am dori doar să arătăm pe baza analizei caracterului modificării perioadei pulsarilor PSR 0833—45 și NP 0532 ce informații prețioase cu privire la stelele neutronice și la proprietățile substanței nucleare care le alcătuiește poate furniza studiul pulsarilor.

Ce sînt de fapt pulsarii? (1971)

Teoreticienii, atît cei care lucrează în domeniul fizicii, cît și astronomii — sînt de obicei cît se poate de mulțumiți de profesiunea lor: să te ocupi cu probleme teoretice este în unele privințe mai ușor și mai eficient decît să observi și să măsoari. Experimentatorii și observatorii, dimpotrivă, sînt de multe ori nemulțumiți de destinul lor: activitatea lor cere un mare volum de eforturi migăloase, dar succesul ei depinde în bună parte de probleme cu totul străine de știință, cum ar fi alocățiile bănești, echipamentul etc. Menționez acestea, deoarece studiul pulsarilor reprezintă un domeniu (bineînțeles nu unicul) în care teoreticienii au toate motivele să-i invidieze pe observatori. În orice caz, în ceea ce mă privește pe mine ca teoretician, pot s-o spun cu toată certitudinea.

Succesul observatorilor este în afară de orice îndoială; în mai puțin de trei ani ei au efectuat o muncă uriașă. Cît despre teoria pulsarilor, ea reprezintă multe aspecte în care nu s-a ajuns încă la concluzii riguros stabilite, așa încît sînt nevoiți să supună atenției dv. aproape numai considerații generale și ipoteze de lucru. Din fericire pentru teoreticieni, situația nu

este așa de defavorabilă în toate domeniile. Se cunosc multe cazuri în care teoria anticipă observațiile. Relativa rămînere în urmă a teoriei pulsarilor se explică prin două împrejurări. În primul rînd e vorba de probleme excepțional de complexe, cum ar fi ecuația de stare a substanței cu o densitate mai mare de 10^{11} g/cm³ sau electrodinamica magnetosferei unei sfere care se rotește rapid și a cărei axă de rotație nu coincide cu axa de simetrie magnetică. În al doilea rînd, diversele date ale observației furnizează doar informații indirecte despre pulsari; de pildă, nu putem examina detaliile suprafeței unui pulsar. E cazul să menționăm că deși în cazul Soarelui observația directă oferă o cantitate imensă de informație privind structura fotosferei și atmosferei lui, în teoria proceselor fizice care au loc în Soare mai există numeroase probleme nerezolvate.

Candidați la titlul de pulsari

Un corp ceresc poate participa la concursul pentru „titlul de pulsar“ dacă este în stare să emită energie cu o perioadă foarte mică și deosebit de stabilă. Este evident că această condiție nu este satisfăcută nici de nebuloase și nici de aglomerațiile de plasmă. De aceea, drept candidați la titlul de pulsari au fost considerate piticele albe, stelele neutronice și stelele duble, precum și obiectele masive „de tip nou“.

De la bun început s-a propus să fie considerate ca mecanism „răspunzător“ de periodicitatea impulsurilor radiației oscilațiile (pulsatiile) și rotația. În prima etapă alegerea între aceste eventualități a fost îngreuiată deoarece se cunoșteau numai pulsari cu o perioadă mai mare de 0,25 s. După descoperirea pulsarilor PSR 0833 și NP 0532, cu perioade respectiv egale cu 0,089 și 0,033 s, situația s-a mai limpezit.

Perioada tonului fundamental al oscilației radiale pentru piticele albe care nu se rotește nu poate fi mai mică de 2 s (ținînd seama de efectele teoriei relativității generalizate). La piticele albe în rotație perioada oscilației evasiradiale poate atinge 0,6 s, iar oscilațiile fundamentale neradiale au o perioadă de circa 0,2 s. La piticele albe, perioade ale oscilațiilor mai mici de 0,2 s se pot observa numai la tonurile secundare. Dar cum s-ar putea explica apariția oscilațiilor la un anumit ton supe-

rior atunci cînd lipsesc total oscilațiile la tonul fundamental și la alte tonuri superioare? Afară de aceasta, care este cauza marii stabilități a oscilațiilor?

Sînt de asemenea limitate perioadele de rotație ale piticelor albe, deoarece de pe suprafața lor nu trebuie să aibă loc o scurgere puternică a substanței, adică accelerația forței de gravitație nu trebuie să depășească accelerația centrifugă. În aceste condiții sînt practic puțin probabile perioadele de rotație mai mici decît o secundă. Prin urmare, pulsarii cu perioadele scurte (mai mici de 1 s) aproape cu certitudine nu pot fi pitice albe. Faptul acesta este confirmat (dar nu demonstrat riguros!) și de împrejurarea că nici un pulsar nu a fost identificat cu o pitică albă. Pulsarii cu perioada mare (peste o secundă) ar putea fi, în principiu, pitice albe în rotație sau în oscilație. Fără argumente convingătoare este totuși greu să admitem că există două tipuri total diferite de pulsari, dintre care unul formează piticele albe, în timp ce celălalt are o natură diferită.

Următorul candidat la titlul de pulsar este steaua neutronică. Perioadele de pulsație a stelelor neutronice grele a căror masă depășește de 1,5—2 ori masa Soarelui, sînt de ordinul a 10^{-3} sau 10^{-4} s, în timp ce perioada stelelor neutronice „ușoare“, cu o masă egală cu 0,2 din masa Soarelui, este de circa 10^{-2} s. Aceste perioade urmează să fie precizate (pe bază de calcule), dar ele sînt, fără doar și poate, mai mici decît perioadele ce se observă la pulsari.

Dimpotrivă, chiar și cea mai scurtă perioadă a unui pulsar (0,033 s) poate fi considerat drept perioadă de rotație a unei stele neutronice. Stelele neutronice „grele“ pot avea o perioadă de rotație mai mare de 10^{-3} s, iar cele „ușoare“, mai mare de 10^{-2} s. Din acest punct de vedere, toți pulsarii cunoscuți pot fi stele neutronice în rotație.

Stelele duble trebuie excluse din lista candidaților la titlul de pulsari. Din cauza radiației gravitaționale perioada unei stele duble trebuie să descrească treptat, în timp ce în cazul pulsarilor perioada crește.

Rămîne să examinăm dacă pulsarii pot fi obiecte „de tip nou“, un fel de quasari în miniatură (care ar putea fi denumiți „quasarino“). Cu alte cuvinte, este posibil ca evoluția sau colapsul stelelor să ducă la diferite configurații de pitice albe, de stele neutronice sau de stele „împietrite“ (colapsionate). Dacă

nu depășim cadrul teoriei relativității generalizate, în căutarea noilor configurații cvasistelare dense va trebui să examinăm „stelele“ la care energia magnetică este comparabilă cu cea gravitațională; pentru satisfacerea acestei condiții cîmpul lor magnetic trebuie să aibă o intensitate de peste 10^{16} Oe. O asemenea eventualitate este foarte puțin probabilă. Există și mai puține temeiuri pentru a construi modele de pulsari renunțînd la ecuațiile teoriei relativității generalizate, modificîndu-le într-un fel oarecare. De aceea, în cele ce urmează vom considera pulsarii drept stele neutronice în rotație, cu atît mai mult cu cît o asemenea imagine a pulsarilor nu stîrnește în stadiul actual obiecții deosebite.

Cum au apărut rotația rapidă și cîmpul magnetic al pulsarilor?

Stelele neutronice trebuie să se rotească foarte repede și să aibă un cîmp magnetic de mare intensitate. Dacă o stea obișnuită a avut la începutul contracției o rază egală cu $3 \cdot 10^{10}$ cm, iar raza stelei neutronice este egală cu $3 \cdot 10^6$ cm, urmează că (în ipoteza conservării masei) momentul de inerție a stelei trebuie să se micșoreze cu opt ordine. De aceea este întru totul firească presupunerea că stelele neutronice se rotește rapid. Astfel, viteza unghiulară de rotație a pulsarului NP 0532 depășește de 10^8 ori viteza unghiulară de rotație a Soarelui.

Situația este analoagă și în ceea ce privește cîmpul magnetic. În stadiul inițial al comprimării, cîmpul stelei putea fi mic — egal, de pildă, cu 1 Oe. În condițiile „înghețării“ liniilor de forță, fluxul magnetic se păstrează, adică intensitatea cîmpului crește proporțional cu r^{-2} (r fiind raza stelei). De aceea la o stea cu o rază de $3 \cdot 10^{10}$ cm, comprimată în așa fel ca raza să ajungă la $3 \cdot 10^6$ cm, intensitatea cîmpului poate să atingă 10^8 Oe.

Este posibil ca inițial cîmpul magnetic al stelei să fi fost cu cîteva ordine mai mare. O asemenea ipoteză explică ușor intensitatea și mai mare a cîmpului magnetic, care se poate ridica bunăoară la $10^{12} \dots 10^{13}$ Oe.

Așadar, pulsarul este o stea neutronică magnetizată care se rotește rapid. Axa de rotație a pulsarului nu coincide cu axa

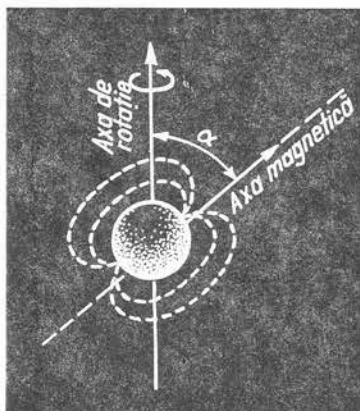


Fig. 29. Rotator înclinat.

lui magnetică, ceea ce înseamnă că pulsarul este un sistem asimetric și nestăionar („un rotator înclinat”). După cum vom vedea mai departe, dacă lucrurile nu ar sta astfel, nu s-ar putea explica apariția impulsurilor de radiație.

Putem arunca o privire în interiorul unei stele neutronice?

Înainte de a răspunde la această întrebare, care ar putea să pară lipsită de seriozitate, să examinăm structura unei stele neutronice „tipice” cu o masă egală cu 0,5 din masa Soarelui, cu o rază de $(1...3) \cdot 10^6$ cm și cu o densitate în centru de ordinul a 10^{15} g/cm³.

În cazul unor densități mai mici de $3 \cdot 10^{11}$ g/cm³, rolul neutronilor mai este încă neglijabil, iar substanța stelei constă din nuclee și electroni. Aceasta înseamnă că stratul exterior al stelei neutronice este de natura plasmă și este asemănător cu substanța piticelor albe. De aici urmează însă o afirmație mai puțin evidentă: învelișul de plasmă al stelei neutronice este solid în partea sa principală, adică steaua are o scoară. Explicația este următoarea: ca urmare a radiației neutrinice și electromagnetice, steaua neutronică având o mare conductibilitate termică, se răcește cu repeziciune; curînd după apariția

ei întreaga stea ajunge practic la o temperatură mai mică de $(1...5) \cdot 10^8$ °K. Or, temperatura de topire a plasmă, formată din electroni și nuclee cu o densitate mai mare de 10^{10} g/cm³, nu este mai mică de 10^8 °K. De aceea, în afară de un strat exterior subțire de plasmă „lichid” sau gazos, un strat relativ mare de plasmă al stelei trebuie să fie solid. Grosimea acestui strat pentru o stea neutronică „tipică” trebuie să fie de ordinul a $10^4...10^5$ cm.

Sub scoară se află lichidul neutronic cu o densitate mai mare de $(5...10) \cdot 10^{13}$ g/cm³, în care apar, în amestec, protoni și electroni. Toate aceste particule (neutroni, protoni, electroni) se află într-o formă degenerată și se poate considera cu oarecare aproximație că sub scoară se află un amestec de lichide: neutronic, protonic și electronic. Un lichid electronic de mare densitate se aseamănă întotdeauna cu un gaz în stare degenerată. Cît despre lichidul neutronic și cel protonic, ele pot trece respectiv într-o stare de suprafluiditate și supraconductibilitate. Așadar, este probabil că sub scoară, substanța stelei neutronice este suprafluidă (fluid neutronic) și supraconductoare (fluid protonic).

În ce stare se află substanța în regiunile cele mai adînci (cu o densitate de peste 10^{15} g/cm³) ale stelei neutronice? Este foarte posibil că în partea centrală a stelelor neutronice suficient de masive (stele „tip”) există un nucleu care nu este suprafluid și supraconductor.

Prin urmare, o stea neutronică „tipică” constă dintr-o anvelopă gazoasă subțire de plasă, dintr-o scoară solidă de plasmă, dintr-un strat supraconductor și suprafluid și, în sfîrșit, din nucleu.

Este deosebit de interesantă posibilitatea apărută oarecum pe neașteptate, de a studia structura stelelor neutronice pe baza modificării perioadelor pulsarului PSR 0833, situat în nebuloasa Vela X, și ale pulsarului NP 0532, situat în nebuloasa Crabului. Modificările perioadei, în special salturile lor, pot fi puse în legătură cu fenomene seismice care au loc în scoară solidă a stelelor neutronice. Într-adevăr, cu timpul, viteza unghiulară a rotației stelelor se micșorează, fenomen însoțit de creșterea perioadei pulsarului. Dar scoară solidă nu-și poate modifica lin forma și, de aceea, în cazul încetîririi rotației trebuie să ne așteptăm la „cutremure”, respectiv la

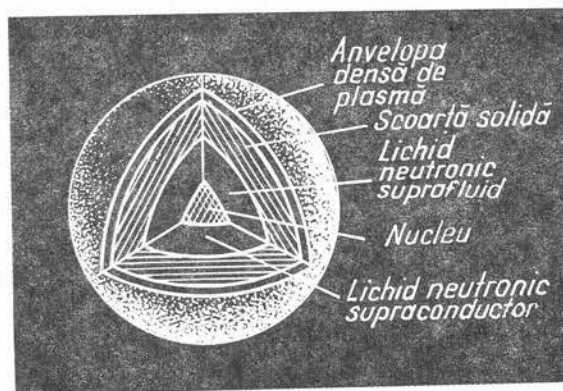


Fig. 30. Structura stelelor neutronice.

aparitia în scoarță a unor fracturi etc., în urma cărora forma scoarței se apropie de o stare de echilibru în condițiile vitezei unghiulare date. Afară de aceasta, după „catastrofă”, perioada pulsarului din nebuloasa Vela X a început să crească mai repede decât înainte de „cutremurul de stea”. Sîntem tentați să punem efectul acesta tocmai în legătură cu suprafluiditatea și supraconductibilitatea lichidului neutro-protonic care se află sub scoarță.

Calcululele arată că stratul lichid neutro-protonic al stelei participă la rotație datorită existenței unor fire turbionare probabil fixate într-un fel oarecare în scoarța solidă. Dacă viteza de rotație nu se schimbă, firele turbionare nu se manifestă, firește, în nici un fel în exterior. Situația se schimbă însă în cazul modificării vitezei unghiulare. Într-un lichid normal (care nu este suprafluid), neutronii fac un schimb foarte rapid de impulsuri cu protonii și electronii (timpul caracteristic fiind de 10^{-15} s). Dacă protonii sînt supraconductori, iar neutronii normali, impulsul se transmite cu mult mai încet (timpul caracteristic 10^{-9} s). În cazul supraconductibilității protonilor și al suprafluidității protonilor, pentru transmiterea impulsului se consumă zile sau chiar ani (!). De aici urmează că atunci cînd momentul de inerție al scoarței se micșorează, la început crește numai viteza ei unghiulară și viteza lichidului protonic și electronic, pe cînd viteza unghiulară a stratului neutronic suprafluid se

modifică cu întîrziere. De aceea pînă la stabilirea unui cvasi-echilibru scoarța este frînată mai puternic decît steana în ansamblul ei. Ca urmare, după „cutremurul de stea” (și, de altfel, independent de natura saltului vitezei unghiulare) creșterea perioadei pulsarului se produce mai repede decît înainte de aceasta.

Menționăm că modificările în salt ale perioadei pulsarilor tineri descoperiți în rămășițele supranovelor pot fi puse, în principiu, în legătură și cu alte fenomene decît „cutremurele” scoarței și cu suprafluiditatea lichidului neutronic. Se cunosc lucrări ai căror autori încearcă să explice tulburările perioadei prin existența unor sateliți ai pulsarilor (planete), prin modificarea pierderilor privind radiația gravitațională și prin alte cauze. Explicația dată mai sus ni se pare însă mai plauzibilă; ea poate fi verificată prin observarea îndelungată a modificării perioadei unui pulsar după „catastrofă” (după saltul perioadei).

Așadar studiul tulburărilor care apar în creșterea seculară a perioadei pulsarilor ne permite să aruncăm o privire în interiorul stelei neutronice. Aceasta cu toate că numai cu puțin timp înainte astronomii nu aveau nici o dovadă nici măcar cu privire la existența însăși a stelelor neutronice. Astăzi a apărut o speranță îndreptățită de a putea studia straturile interne ale acestor stele. Asemenea succese sînt de natură să însuflețească pe oamenii de știință.

Mecanismul radiației și regiunile emițătoare de radiații ale pulsarilor

Aproape întreaga informație cu privire la pulsari ne vine ca urmare a analizei radiației lor. Este limpede că problema mecanismului radiației pulsarilor și cea a structurii regiunilor care le emit au o importanță primordială.

Una dintre concluziile esențiale care se pot trage ușor pe baza estimărilor temperaturii de strălucire constă în faptul că radiația în domeniul radio a pulsarilor nu poate fi incoerentă.

Să amintim că pentru mecanismele incoerente ale radiației — în absența absorbției sau reabsorbției (este vorba de absorbția efectuată de înseși particulele emițătoare de radiații) — puterea totală sau luminozitatea sistemului de particule emițătoare de radiații (molecule, atomi, electroni) este egală cu suma puterilor radiației diverselor particule. În cazul mecanismului coerent al radiației, luminozitatea unui asemenea sistem depășește puterea totală a radiațiilor diverselor particule. Printre sursele coerente se numără, în afară de pulsari, unele componente ale radiației radio solare și maserale cosmice din liniile OH și din alte molecule.

În condițiile cosmice sînt reale, după părerea noastră, numai mecanismele coerente de radiație ale maserelor. Tocmai mecanismele maserelor pot asigura radiația net orientată și polarizată, atât de caracteristică pentru pulsari.

În centrul de gravitate al problemei radiației pulsarilor se situează alegerea modelelor de regiuni emițătoare de radiații, întrucît nici din punct de vedere energetic, nici sub raportul posibilităților diverselor mecanisme de radiație nu apar dificultăți. În același timp rămîn neclarificate chiar și probleme atât de fundamentale ca tipul schemei geometrice a orientării radiațiilor, distribuția după viteze a particulelor plasmei în regiunile emițătoare de radiații ș.a.

Pentru ca radiația unei stele în rotație să fie observată sub forma unor impulsuri relativ scurte (avînd durată impulsului cu mult mai mică decît perioada pulsarului), unghiul caracteristic de deschidere în schema geometrică a orientării radiației $\Delta\varphi$ trebuie să fie suficient de mic (modelele emițătoarelor de radiații în rotație cu asemenea diagramă sînt adesea denumite modele cu „far”). Pentru NP 0532 unghiul $\Delta\varphi$ este egal cu 20... 30°, iar pentru majoritatea celorlalți pulsari, el este și mai mic. Dacă unghiul $\Delta\varphi$ caracterizează deschiderea diagramei în toate direcțiile, avem de a face cu o geometrie „în creion”; axa ei poate coincide, bunăoară, cu axa de simetrie magnetică, de pildă cu direcția dipolului magnetic. O altă eventualitate este geometria „în cuțit”, cînd unghiul $\Delta\varphi$ determină doar cea mai mică deschidere a schemei geometrice, iar în direcția perpendiculară unghiul de deschidere poate să atingă chiar 2π . O asemenea diagramă va rezulta, de pildă, dacă radiația este concentrată în unghiul $\Delta\varphi$ în vecinătatea planului ecuatorial

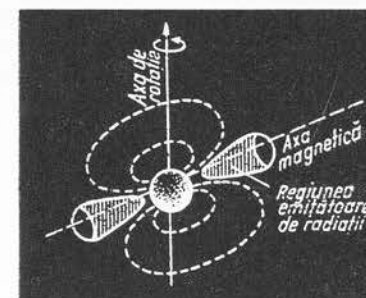
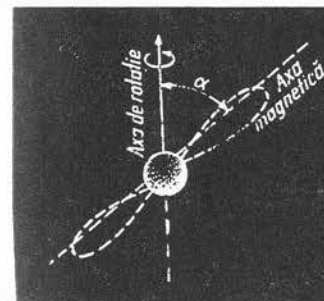


Fig. 31. Geometria „în creion” a orientării (secțiune) și modelul regiunilor emițătoare de radiații ale pulsarului, situate în vecinătatea polilor.

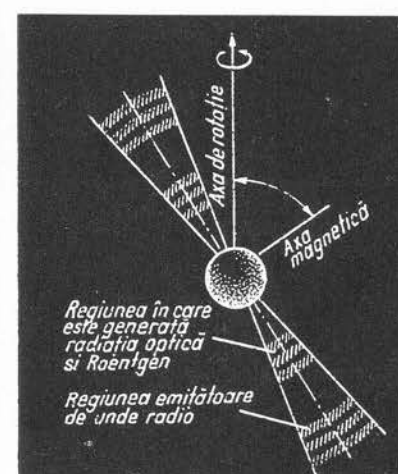
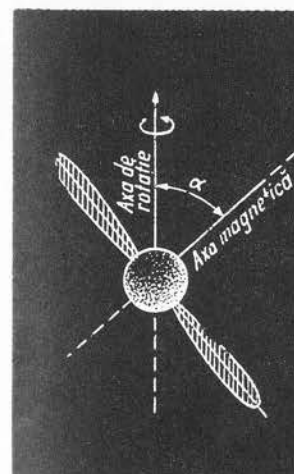


Fig. 32. Geometria „în cuțit” a orientării (secțiune) și modelul regiunilor emițătoare de radiații ale pulsarului (NP 0532).

al stelei magnetice. Pentru moment nu este clar de care din aceste două tipuri țin schemele geometrice ale orientării radiației pulsarilor.

Modelele sincrotrone ale radiației infraroșii, ale celei vizibile (optice) și ale radiației Roentgen a pulsarului NP 0532 pot avea un spectru observabil. Construirea unor ase-

menea modele nu prezintă dificultăți. Ele nu sînt însă univoce atît timp cît rămîne deschisă problema parametrilor regiunilor emițătoare de radiații (forma lor, configurația cîmpului etc.). Afară de aceasta, trebuie să avem grijă ca modelul să fie consecvent, adică să examinăm nu numai radiația, ci și accelerația particulelor, acumularea lor în zonele de radiație etc. Analiza acestor probleme este poate sarcina cea mai actuală a teoriei pulsarilor.

Pulsarii în serviciul astronomiei și al fizicii

Consecința cea mai importantă a descoperirii pulsarilor este identificarea lor foarte plauzibilă cu stelele neutronice. (Pentru prima oară stelele neutronice au fost menționate într-o lucrare a lui W. Baade și F. Zwicky din 1934). Este necesar nu numai să studiem pulsarii înșiși (stelele neutronice), dar să și clarificăm rolul lor în anvelopele supranovelor. Este posibil ca totemai pulsarii să accelereze în aceste nebuloase particulele care intră în componența radiației cosmice.

Faptul că pulsarii emit semnale puternice și în același timp riguros periodice (se poate estima chiar creșterea seculară a perioadei), permite utilizarea lor în astronomie și fizică. De altfel unele aplicații astronomice ale pulsarilor nu sînt legate de periodicitatea radiației, ci de polarizarea ei, precum și de caracterul punctual sau de poziția adecvată a surselor pe sfera cerească.

Așa, de pildă, pulsarii ne permit să obținem o informație valoroasă despre mediul interstelar. Pe baza datelor oferite de pulsari a fost precizată concentrarea medie a electronilor în planul Galaxiei. Ea este egală cu 0,05 electroni la 1 cm^3 . Neomogenitățile mediului interstelar trebuie să ducă în mod firesc la fluctuații ale intensității radiației hertziene ale surselor discrete, receptate pe Pămînt. Posibilitățile unor observații corespunzătoare au fost discutate încă înainte de descoperirea pulsarilor, dar abia astăzi ele au devenit realizabile. Se înțelege că în fluctuațiile intensității un anume rol îl poate avea „coroana” pulsarului însuși și mediul interplanetar.

Aportul acestuia din urmă poate fi ușor eliminat; uneori, dimpotrivă, pulsarii pot fi utilizați pentru cercetarea supracoroanei solare.

În timpul trecerii în apropierea Soarelui impulsul electromagnetic suferă două efecte strîns legate între ele ale teoriei generalizate a relativității: devierea și întîrzierea suplimentară, care se ridică la $2 \cdot 10^{-4} \text{ s}$, dacă raza se deplasează în imediata vecinătate a discului solar. Efectul al doilea trebuie să ducă la modificarea anuală a perioadei pulsarilor care se află pe sfera cerească în apropierea Soarelui. Observarea unor asemenea pulsari ar putea fi folosită pentru verificarea teoriei relativității generalizate (de altfel utilizarea pentru același scop a unei planete artificiale avînd la bord un radioemîțător pare o soluție mai de perspectivă.

Lista problemelor din domeniul astronomiei și al fizicii pentru care cercetarea pulsarilor prezintă interes ar putea fi prelungită.

Pulsarii și dezvoltarea astronomiei

Descoperirea pulsarilor a fost a cincea descoperire astronomică remarcabilă din deceniul precedent. Celelalte descoperiri din anii '60 sînt: quasarii, sursele cosmice Roentgen (stelele Roentgen), radiația termică remanentă cu o temperatură de $2,7^\circ \text{ K}$ și maserile cosmice din moleculele de OH, H_2O ș.a. Menționez că deși în domeniul fizicii au fost obținute în aceeași perioadă multe realizări, numai două dintre ele ar putea fi comparate ca importanță cu cele de mai sus: demonstrarea existenței a două tipuri de neutrini (miuonici și electronici) și descoperirea neconservării parității combinate în cazul interacțiunilor slabe. Urmează de aici că astronomia a luat-o înaintea fizicii, deși, bineînțeles, aceasta a devenit posibil numai ca urmare a folosirii unor domenii noi ale spectrului și a unor metode fizice noi pentru astronomie (recepționarea undelor radio, detectarea razelor Roentgen etc.). Cu alte cuvinte, valul de descoperiri astronomice este un rezultat al transformării astronomiei din una optică într-o astronomie a tuturor undelor.

Aș vrea însă să subliniem aici în mod deosebit un fapt: după câte știm astăzi, nici una dintre descoperirile astronomice noi nu ne-a condus în afara legilor fizice cunoscute, nu ne-a obligat să revizuim sau să modificăm ceva în fundamentele fizicii. Mai mult decât atât, unele dintre noile obiecte și fenomene fuseseră încă de mult prevăzute, se aflau, cum s-ar zice, „în vârful condeiului”. Aceasta se referă și la stelele neutrice. Așadar, fără a minimaliza cîtusi de puțin strălucitele succese ale astronomiei din ultimul timp, se poate constata că aceste succese nu au depășit încă cadrul astronomiei și, cel puțin după părerea majorității astronomilor și a fizicienilor, nu au confruntat fizica cu noi probleme de principiu.

Se va menține oare această situație și în viitor și, în general, ce descoperiri sau modificări cu caracter principial se pot aștepta în astronomie într-un viitor previzibil? Atitudinea cea mai prudentă ar consta în a nu ridica o asemenea problemă, deoarece profeții (sau, ca să folosim un termen mai prozaic, alcătuirii de prognoze) au o singură trăsătură comună: cu toții greșesc, cel puțin parțial. Afară de aceasta, după cum se știe, cele mai interesante și valoroase pentru știință se dovedesc adeseori acele descoperiri care nu au fost prevăzute.

Și totuși, fără să pretindem că depășim sfera unor afirmații banale, să indicăm câteva posibilități care au mai fost discutate¹.

Ne putem aștepta într-un viitor apropiat să fie înregistrați neutrini proveniți din Soare, iar ulterior, poate, și neutrini care se formează cu prilejul apariției supranovelor, adică în procesul de formare a stelelor neutrice și totodată a pulsarilor. Atunci vom obține informații prețioase nu numai cu caracter astronomic, ci și ținînd de fizica neutrinilor. Într-un viitor mai depărtat se va izbuti, poate (ceea ce ar fi deosebit de interesant), să se detecteze neutrini de origine remanentă, generați în stadiile timpurii ale evoluției metagalaxiei. Așadar, una dintre direcțiile astronomiei zilei de mîine este astronomia neutrinică.

Ipoteza undelor gravitaționale (avem în vedere, bineînțeles, unde existente în vid) s-a născut cu peste o jumătate de secol în urmă, odată cu teoria relativității generalizate. (Formula referitoare la puterea radiației gravitaționale a fost dedusă

¹ Lăsăm la o parte problema originii sistemului solar, a structurii Lunii și a planetelor etc., cît și problema descoperirii unor fenomene de viață sau a unor civilizații extraterestre.

de Einstein în 1918). Pînă în prezent însă, undele gravitaționale nu pot fi considerate ca fiind descoperite cu certitudine, deoarece sensibilitatea receptoarelor este foarte mică în comparație cu receptoarele de unde electromagnetice. Cu toate acestea sîntem în drept să credem că încă în acest secol se va putea recepționa radiația gravitațională de la stelele duble și, poate, și de la pulsari (termenul de trei decenii pe care-l acordăm pentru realizarea acestui obiectiv nu trebuie să pară prea mare dacă ne gîndim că undele gravitaționale își așteaptă detectarea de peste 50 de ani). Recepționarea undelor cosmice gravitaționale va inaugura „astronomia undelor gravitaționale” și, poate, va aduce multe descoperiri neașteptate.

Majoritatea fizicienilor, printre care și autorul, cred în justetea teoriei relativității generalizate, cel puțin pentru cîmpurile de gravitație care nu sînt prea puternice. Dar verificarea continuă a acestei teorii pe calea experienței, chiar pentru cîmpurile slabe, este desigur necesară. După descoperirea turtirii Soarelui s-a creat aici o situație cît se poate de dramatică¹. Dacă s-ar lămuri că teoria relativității generalizate necesită, chiar în cîmpurile slabe de gravitație (în limitele sistemului solar), unele completări, aceasta ar constitui un eveniment științific de maximă importanță. În acest caz, astronomia ar face încă o dată fizicii un serviciu inestimabil.

Probabilitatea faptului că legile și teoriile fizicii cunoscute nouă nu sînt suficient de precise crește pe măsura trecerii la dimensiuni spațio-temporale tot mai mari și la mase și densități tot mai mari ale substanței. Aceasta se referă și la teoria relativității generalizate și la fizica particulelor elementare. După cum se știe, o serie de astronomi au formulat deja ipoteza că în univers nu se menține numărul barionilor (generarea substanței în cosmologia staționară etc.), că în cîmpuri puternice (de pildă în cazul colapsului gravitațional) sînt încălcate ecuațiile teoriei relativității generalizate, că există protocorpuri supra-masive și foarte dense, dar uneori active, în stele și mai cu seamă în nucleele galaxiilor etc. Cosmologia staționară pare azi practic infirmată, dar în celelalte cazuri menționate mai sîntem încă departe de claritate. Privind lucrurile de pe pozițiile adepților „conservatismului sănătos”, dintre care mă

¹ Savantul american R. H. Dicke încearcă, în această privință să pună bazele unei noi teorii gravitaționale (N. T.).

consider că fac parte, introducerea unor concepții fundamentale noi poate fi admisă numai pe baza unor argumente convingătoare. În prezent, asemenea argumente încă nu există. Dar, desigur, problema căutării de concepții și idei fundamentale în astronomie, inclusiv cosmologia, nu numai că este actuală, dar dintr-un punct de vedere este chiar cea mai interesantă.

Ce legătură au însă aceste observații cu pulsarii?

Trebuie să arătăm că toate direcțiile menționate (și practic toate direcțiile cunoscute nouă) ale viitoarelor cercetări astronomice cu caracter fundamental sînt direct sau indirect legate de stelele neutronice și deci și de pulsari! Într-adevăr, tocmai stelele neutronice sînt implicate în sursele potențiale cele mai puternice ale neutrinilor cosmici și ale undelor gravitaționale. Dintre toate stelele cunoscute, la stelele neutronice sînt deosebit de intense efectele relativiste, și de aceea problema limitelor aplicabilității teoriei relativității generalizate are în acest caz o importanță deosebit de mare. În sfîrșit, densitatea substanței în regiunile centrale ale stelelor neutronice are valorile cele mai mari în comparație cu toate obiectele cunoscute (și nu numai cu cele ipotetice). De aceea o fizică „nouă” — dacă ea se va dovedi necesară — nu va putea să oculească stelele neutronice.

În felul acesta, pulsarii se află nu numai în centrul intereselor astronomiei actuale, dar, după toate probabilitățile, vor rămîne în centrul atenției încă mulți ani, ba chiar timp de decenii.

Cuprinsul

<i>Prefață</i>	5
1	
<i>Astrofizica contemporană</i>	7
Care sînt cele mai caracteristice trăsături ale astrofizicii contemporane?	8
Noi rezultate ale cercetărilor astrofizicii	15
Astrofizica radiației cosmice	18
Stelele neutronice și astronomia Roentgen	23
Problemele fundamentale cu care este confruntată astrofizica contemporană	30
Progresele astrofizicii și organizarea științei	40
2	
<i>Structura universului și evoluția lui în timp</i>	47
Locul cosmologiei în cadrul astronomiei	47
Primele modele cosmologice	49
Teoria relativității restrînsă	54
Teoria relativității generalizate	58
Lumea sferică a lui Einstein	66
Cosmologia staționară a lui Friedman și modelele newtoniene ale universului	70
Deplasarea cosmologică spre roșu a liniilor spectrale	77
Radiogalaxiile și quasarii, martori ai trecutului îndepărtat	83

Termenul A și modelul cosmologic al lui Lemaitre.....	88
Înapoi spre „origine”. Radiația termică remanentă	94
Și mai aproape de „origine”	98
Cosmologie și filozofie	103
Problema cosmologică.....	107
Încheiere	112
Apendice	112

3

<i>Astrofizica radiației cosmice</i>	118
Introducere	118
Radiația cosmică din vecinătatea Pământului	121
Radiația cosmică în univers.....	135
Originea radiației cosmice	149
Anexă. Unele probleme teoretice privind originea radiației cosmice	161

4

<i>O mare descoperire: pulsarii</i>	169
Anexa I (iunie 1969)	193
Anexa II (martie 1970)	198

5

<i>Ce sînt de fapt pulsarii? (1971)</i>	202
Candidați la titlul de pulsari.....	203
Cum au apărut rotația rapidă și cîmpul magnetic al pulsarilor?	205
Putem arunca o privire în interiorul unei stele neutronice?	206
Mecanismul de acțiune și regiunile emitoare de radiații ale pulsarilor	209
Pulsarii în serviciul astronomiei și al fizicii	212
Pulsarii și dezvoltarea astronomiei	213

În colecția

ENCICLOPEDIA DE BUZUNAR

Seria „SINTEZE”

a apărut:

B.G. Kuznețov

ȘTIINȚA ÎN ANUL 2000

O știință nouă — futurologia — știință despre dezvoltarea viitoare a științei, tehnicii etc.; un autor de prestigiu, gînditor îndrăzneț și profund; o lucrare originală, de o factură neobișnuită, care reușește să redea „suflul timpului”. Punînd în evidență schimbările esențiale pe care „secolul lui Einstein” le-a adus în concepțiile, metodele și idealurile științei, autorul trasează prognoza uimitoarelor realizări ale științei și tehnicii în următoarele 3—4 decenii. Dezvoltarea *Fizicii ultrarelativiste* va revoluționa teoria particulelor elementare. Explorarea microcosmosului se va îmbina cu cercetarea spațiilor metagalactice de pe observatoare situate în afara sistemului solar. Autorul schițează contururile *civilizației postatomice*, în care munca omenească va fi radical transformată și în care omul va începe să domine procesele fiziologice, inclusiv cele de care depind îmbătrînirea și moartea.

Lucrarea este interesantă atît prin viziunea de ansamblu a treptelor pe care le va urca gîndirea și acțiunea umană, cît și prin previziunile privind fiecare din diversele științe și discipline: matematica, cibernetica, energetica, electronica cuantică, biologia moleculară, astrofizica etc. sau surprinzătoarele efecte ale intersectării lor. Ea se caracterizează prin vastitatea documentării și scrupulozitatea în alegerea faptelor, prin seriozitatea analizei și capacitatea de sinteză, prin lărgimea orizontului științific, filozofic și social. O lectură captivantă pentru orice intelectual.

În colecția

ENCICLOPEDIA DE BUZUNAR

Seria „SINTEZE“

a apărut:

Toma Vescan

CUANTELE, O REVOLUȚIE ÎN FIZICĂ

Alături de teoria relativității, mecanica cuantică este un nou capitol al fizicii care a revoluționat cunoștințele noastre și imaginea de ansamblu pe care ne-am făcut-o asupra lumii. Lucrarea corespunde cerinței imperios resimțite de a face accesibilă cititorului fără o solidă pregătire matematică această disciplină indispensabilă pentru a înțelege uriașele realizări ale fizicienilor din ultimele patru decenii. Prezintă mecanica cuantică în nașterea și dezvoltarea ei, autorul reușește să pună în evidență aportul adus de marile personalități ale fizicii contemporane: Einstein, Rutherford, Bohr, Sommerfeld, de Broglie, Schrödinger, Born, Heisenberg, Pauli și alții. O bogată și sugestivă ilustrație contribuie la accesibilitatea lucrării.